

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství

Katedra tepelné techniky

Vliv recyklace brusného prachu na výrobu a vlastnosti cihel

The influence of recycling of grinding dust on brick manufacturing
and their properties

Autor diplomové práce: Bc. David Křižan
Vedoucí bakalářské práce: Ing. Miroslava Klárová, Ph.D.

Ostrava 2018

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra tepelné techniky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. David Křižan**
Studijní program: **N2109 Metalurgické inženýrství**
Studijní obor: **2109T039 Tepelná technika a keramické materiály**
Téma: **Vliv recyklace brusného prachu na výrobu a vlastnosti cihel**
The influence of recycling of grinding dust on brick manufacturing and their properties
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

1. Výroba cihlářského zboží
2. Možnosti recyklace vlastních odpadů
3. Návrh a příprava cihlářského zboží s odpadní surovinou
4. Vliv obsahu odpadní suroviny na vlastnosti cihel

Seznam doporučené odborné literatury:

- 1) PYTLÍK, Petr. *Cihlářství*. Brno: FS VUT, 1995. ISBN 80-214-0612-7.
- 2) LACH, Vladimír. *Keramická příručka: tabulky a výpočty*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1958
- 3) ŠAŠEK, Ladislav. *Laboratorní metody v oboru silikátů*. Praha: SNTL, 1981.
- 4) BENDER, Willi. *Vom Ziegelgott zum Industrieelektroniker: geschichte der ziegelherstellung von den anfängen bis heute*. 1. Auflage. Bonn: Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e. V., 2004. ISBN 3-9807595-1-2.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Miroslava Klárová, Ph.D.**

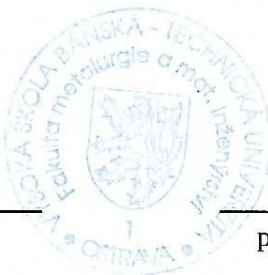
Konzultant diplomové práce: **Štěpán Slovák**


Datum zadání: **30.11.2017**

Datum odevzdání: **23.04.2018**



doc. Ing. Jozef Vlček, Ph.D.
vedoucí katedry





prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty

Zásady pro vypracování diplomové práce

I.

Diplomovou prací (dále jen DP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání diplomové práce:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list | 6. Obsah DP |
| 2. Originál zadání DP | 7. Textová část DP |
| 3. Zásady pro vypracování DP | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 9. Přílohy |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání DP student obdrží na své oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování diplomové práce“ následují za originálem zadání DP. („Zásady pro vypracování diplomové práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání DP. V případě, že DP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnícké nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním DP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah DP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části DP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část DP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním DP;
- Vlastní rozpracování DP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků DP z hlediska stanoveného zadání.

DP bude zpracována v rozsahu min. cca 45 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující **doporučené** úpravy - písmo Times New Roman 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. Matematické vzorce musí být číslované (v kulatých závorkách). U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury. Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 8) DP bude obsahovat alespoň 15 literárních odkazů, z toho nejméně 5 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu DP.

ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Diplomovou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra

uprostřed: *DIPLOMOVÁ PRÁCE*

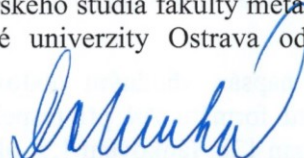
dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě. Po vložení DP do IS EDISON bude provedena její kontrola na plagiátorství.

IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování diplomové práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem magisterského, resp. navazujícího magisterského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2017/2018.

Ostrava 13. 11. 2017


Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 – školní dílo);
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB – TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval samostatně.

V Ostravě 23.4.2018

..... David Kriván
podpis (jméno a příjmení studenta)

Poděkování

Úvodem bych chtěl poděkovat vedoucí mé diplomové práce Ing. Miroslavě Klárové, Ph.D. za cenné rady a sdílení svých zkušeností při tvorbě této diplomové práce a také společnosti Wienerberger cihlářský průmysl, a. s. za přístup ke svým výrobním datům a poskytnutí surovin pro experimentální část práce. Poděkování patří také laborantu závodu Wienerberger cihelna Jezernice s. r. o. Štěpánu Slovákovi za konzultace ohledně zkoušení cihlářských výrobků v cihlářské praxi.

Diplomová práce vznikla za podpory grantových projektů SP 2018/94 Tepelné procesy v průmyslu a zvyšování jejich energetické účinnosti a SP 2018/60 Specifický výzkum v metalurgickém, materiálovém a procesním inženýrství.

ABSTRAKT

Diplomová práce se ve svých kapitolách zabývá technologií výroby cihlových bloků a z praktického hlediska zkoumá vliv recyklace brusného prachu na jejich výrobu a vlastnosti.

V první kapitole jsou uvedeny a charakterizovány suroviny používané v závodu Wienerberger cihelna Jezernice s. r. o. pro výrobu cihlových bloků systému POROTHERM. Druhá kapitola pojednává o technologii výroby, v závěrečné kapitole jsou popsána zjištění vzniklá při praktickém experimentu, ve kterém byl zkoumán vliv přídavku brusného cihlového prachu do výrobní směsi na důležité vlastnosti střepu cihlových bloků.

Klíčová slova

Cihlářství, cihly, recyklace, odpad, brusný prach

ABSTRACT

The chapters of this diploma thesis deals with the production of perforated bricks and examines the influence of recycling of grinding dust on brick manufacturing and their properties.

The first chapter presents and characterizes raw materials used to produce POROTHERM system bricks in the Wienerberger brick factory Jezernice Ltd. The second chapter describes the technology of production and the final chapter describes the findings of a practical experiment in which the influence of the addition of grinding dust in the production mixture on the important properties of brick blocks was investigated.

Key words

Brickmaking, bricks, recycling, waste, grinding dust

OBSAH

1	ÚVOD	9
2	SUROVINY PRO VÝROU CIHLÁŘSKÝCH VÝROBKŮ	10
2.1	Plastické suroviny	10
2.2	Neplastické suroviny	10
2.2.1	Ostřiva.....	11
2.2.2	Lehčiva.....	11
2.2.3	Paliva.....	11
2.2.4	Taviva	11
2.2.5	Plastifikační přísady	11
2.2.6	Barviva	11
2.3	Suroviny používané v závodě Wienerberger cihelna Jezernice s.r.o.....	12
2.3.1	Jílová zemina	12
2.3.2	Spraš.....	13
2.3.3	Dřevěné piliny.....	14
2.3.4	Struska.....	14
2.3.5	Písek.....	14
2.3.6	Papírenské kaly	15
2.3.7	Brusný prach	15
2.3.8	Voda.....	15
3	TECHNOLOGIE VÝROBY	16
3.1	Těžba surovin.....	16
3.2	Skladování surovin a přísad.....	17
3.3	Přípravna.....	17
3.3.1	Dávkování jílu a přísad	17
3.3.2	Homogenizace a drcení.....	18
3.4	Lisování a nakládání na sušárenské vozy	19
3.5	Sušení a překládání na pecní vozy.....	20
3.6	Výpal.....	22
3.7	Broušení.....	23
3.8	Třídění.....	23
3.9	Balení, skladování a expedice.....	23
3.10	Kontrola hotových výrobků	24
4	STUDIUM RECYKLACE BRUSNÉHO PRACHU	25
4.1	Problematika recyklace.....	25
4.2	Experiment.....	27
4.2.1	Volba lisovací síly.....	27
4.2.2	Příprava vzorků.....	30
4.2.3	Výsledky experimentu	33
4.2.4	Vyhodnocení experimentu	41
4.2.5	Praktická aplikace	42
5	ZÁVĚR.....	44
	Seznam použité literatury	45

Seznam obrázků.....	47
Seznam tabulek.....	48

1 ÚVOD

Keramika je souhrnný název pro výrobky vznikající z anorganických surovin tavením nebo pálením. Charakteristickými rysy produktů jsou především heterogenní struktura, pórovitost, pevnost a odolnost vůči vodě.

Nejstaršími obory keramické výroby jsou cihlářství a hrnčířství, jejichž historie sahá tisíce let do minulosti. Dlouhou dobu byl obor založen výhradně na empirii, až přelom 19. a 20. století přinesl první vědecké poznatky, které ve 20. letech minulého století vedly ke schopnosti tvořit výrobky předem definovaných vlastností, což také dopomohlo k rozšíření množství oborů využívajících keramické materiály.

Cihlářské výrobky jsou tradičním stavebním materiálem, který je v tomto oboru po betonech a bitumenech (živcích) třetím nejpoužívanějším. Je typický velkým objemem výroby, příznivou cenou výrobku vztaženou na hmotnost materiálu, ale také vysokými nároky na množství těžených surovin a z toho vyplývající zabranou plochou zemědělské půdy.

Dříve se ke stavebním účelům využívaly cihly plné, vývoj technologie v posledních desítkách let však umožnil masovou výrobu děrovaných cihlových bloků, které se vyznačují daleko lepšími tepelně-izolačními vlastnostmi. Jedním z předních výrobců stavebních cihlových materiálů je rakouská společnost Wienerberger AG s celosvětovým polem působnosti. V České republice zaujímá místo na trhu od roku 1992 a provozuje zde celkem šest cihelen na výrobu cihlových systémů POROTHERM a mnoho dalších provozů produkujících střešní krytinu, lícové cihly, dlažby, potrubní systémy a další. Tato diplomová práce se zabývá studiem cihlářských produktů vyráběných v jednom ze závodů, nacházejícím se v Jezernici nedaleko Lipníka nad Bečvou. [1] [3]

2 SUROVINY PRO VÝROU CIHLÁŘSKÝCH VÝROBKŮ

Suroviny a přísady pro přípravu cihlářské směsi lze rozdělit dle mnoha různých hledisek. Z pohledu reologie se jedná o 2 základní skupiny, plastické a neplastické.

2.1 Plastické suroviny

Podle druhu výrobku a ostatních přísad má plastická složka typické zastoupení v surovinové směsi mezi 40 a 60 %. Tvoří ji jílové zeminy vznikající sedimentací zvětralých hornin, které ve směsi zastávají funkci pojiva, za přítomnosti vody jsou schopné tvarování a lze je následně sušit a vypalovat. Charakteristickými vlastnostmi plastických surovin jsou jejich zrnitost, množství obsažené vody a také chování při sušení a při výpalu.

Dle velikosti zrn lze jílové zeminy rozdělit od nejjemnějších po nejhrubší na jíl, hlínu, prach a písek (viz tab. 1). Dále je můžeme rozdělit podle typických jílových materiálů na kaolinické, montmorillitické, illitické, a chloritické. [1] [8]

Tabulka 1. Rozdělení jílových zemin podle granulometrie [1]

Jíl	$\geq 50 \%$ jíloviny	
Hlína	20–50 % jíloviny, 50–80 % prachoviny	
Prach	$< 20 \%$ jíloviny, $> 30 \%$ prachoviny	
Písek	$< 20 \%$ jíloviny, $> 50 \%$ pískoviny	
Jílovina	Prachovina	Pískovina
$d < 2 \cdot 10^{-6} \text{ m}$	$d \in (2; 50) \cdot 10^{-6} \text{ m}$	$d \in (0,05; 2) \cdot 10^{-3} \text{ m}$

2.2 Neplastické suroviny

Abychom upravili chování výrobní směsi při tvarování, sušení a pálení, přidáváme do ní neplastické suroviny. Použít lze přírodní suroviny, ale s výhodou také různé průmyslové odpady jako např. papírenské kaly, dřevěné piliny, strusky z kotlů, práškové uhlí, petrolkoks, kamenný prach, odpadní polystyrén aj. Rozhodující roli ve volbě použitého odpadu hraje především jeho místní a finanční dostupnost. [1]

Podle účinku na výsledné vlastnosti a kvalitu výrobků rozdělujeme přísady do několika skupin na:

- Ostřiva
- Lehčiva
- Paliva
- Taviva
- Plastifikační přísady
- Barviva [8]

2.2.1 Ostřiva

Tyto přísady zhoršují plastické vlastnosti, naopak však zlepšují odvádění vlhkosti ze středu výlisku na povrch a také snižují lineární smrštění plastických surovin sušením. To pozitivně působí na sušící vlastnosti cihel a vznik vad při sušení. Jako ostřiva se běžně využívají například křemenné písky, podsítné podíly z kamenolomů, strusky z kotlů, dřevěné piliny aj. [4] [8]

2.2.2 Lehčiva

Lehčiva zvyšují pórovitost střepu vyhoříváním spalitelných podílů nebo díky své vlastní nižší objemové hmotnosti a tím jej vylehčují. Zvýšení pórovitosti s sebou však nese snížení pevnosti výrobku v tlaku. Většina látek používaných v cihlářství jako lehčivo, například dřevěné piliny, hnědé i černé uhlí, polystyrenový odpad, působí zároveň jako ostřivo a palivo. [4] [8]

2.2.3 Paliva

Paliva jsou všechny přísady ve výrobní směsi, jejichž oxidací při výpalu vzniká teplo. Tepelná energie získaná z těchto hořlavých příměsí se může podílet až desítkami procent na celkové spotřebě energie nutné na výrobu zboží. Tím je možno dosáhnout značné úspory za vytápění pece, je však třeba počítat, že paliva zároveň působí jako lehčiva se všemi nevýhodami, které přináší. V praxi se jako paliva využívají strusky z kotlů, petrolkoks, uhlí, dřevěné piliny aj. Zdrojem energie mohou být také organické složky jílových zemín.

2.2.4 Taviva

Hlavním úkolem taviv je snížení teploty slinutí výrobku, které umožňuje snížit teplotu výpalu a tím současně náklady za vynaloženou tepelnou energii při výrobě. Taviva také zvyšují pevnost a objemovou hmotnost střepu, snižují nasákavost a zlepšují odolnost vůči mrazu, na druhou stranu však zvyšují smršťování výrobku při výpalu, což vede ke vzniku vad zboží. Jako taviva jsou používány živce, vápence a jiné suroviny obsahující silikáty, železnatany a zásadité oxidy (CaO , MgO , FeO , K_2O , Na_2O). [3] [8]

2.2.5 Plastifikační přísady

Tyto přísady zlepšují tvářecí schopnosti a mechanickou pevnost po sušení i po výpalu. V praxi se většinou jedná o odpady z chemických procesů, které obsahují rozpustné alkalické soli a mají vliv na výměnnou kapacitu v jílech (schopnost systému poutat ionty). Přítomnost těchto látek v cihlářské směsi není nutná. [4] [8]

2.2.6 Barviva

Tyto přísady upravují barvu vypáleného střepu. Jedná se většinou o oxidy kovů, především železa, chromu nebo manganu. Použití čistých oxidů je finančně příliš nákladné,

s výhodou se tedy využívá barvení průmyslovými odpady (struskou z výroby oceli nebo odpady z těžby rud). [4] [8]

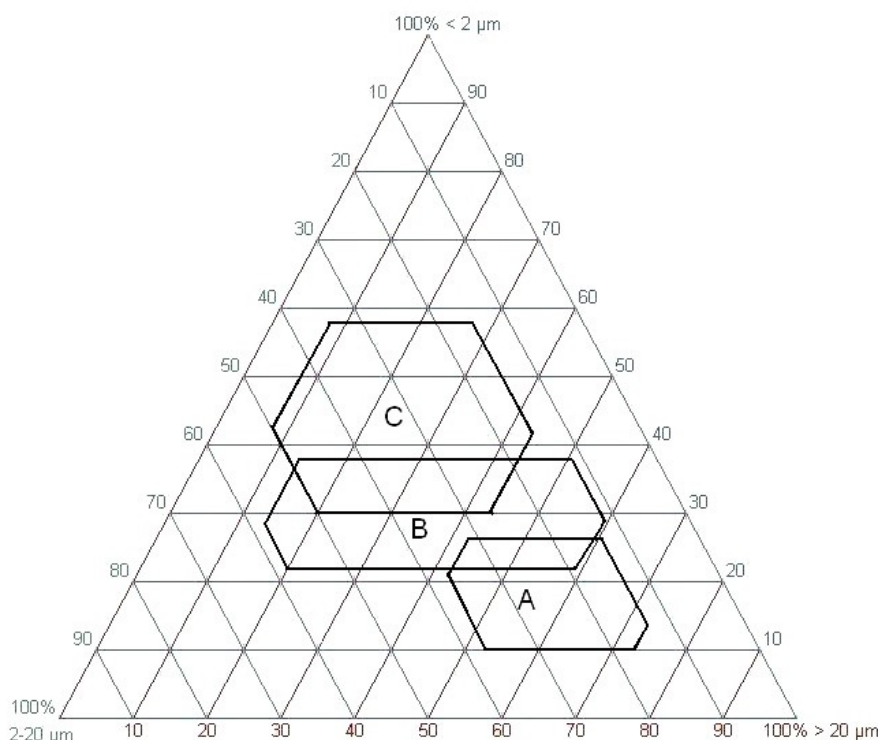
2.3 Suroviny používané v závodě Wienerberger cihelna Jezernice s.r.o.

Ve výrobním závodě v Jezernici je v současné době používáno sedm různých surovin pro výrobu cihlářské směsi. Z nich jsou míchány tři základní receptury, které jsou neustále zlepšovány a přizpůsobovány aktuálním potřebám a dostupnosti přísad od externích dodavatelů tak, aby byla zajištěna stálá kvalita výrobků. V následujících kapitolách jsou uvedeny konkrétní materiály používané v závodě v Jezernici a popsány jejich funkce ve výrobní směsi.

2.3.1 Jílová zemina

Jílová zemina je hlavní plastickou složkou cihlářského těsta a je těžena v hliništi, které je součástí výrobního závodu. Umístění závodu bylo vybráno na základě geologických průzkumů tak, aby se v jeho blízkosti nacházela dostatečná zásoba hlíny vhodná pro výrobu děrovaných bloků systému POROTHERM dle diagramu na obr. 1. [5] [8]

Bližší rozbor chemického a fázového složení je uveden v následující podkapitole.



Obr. 1. Winklerův diagram pro cihlářské hlíny

- A – Základní jednoduché výrobky
- B – Zdicí mnohoděrované výrobky
- C – Tenkostěnné výrobky a krytina

Svrchní vrstvu hlinišť tvoří humózní hlíny o mocnosti 0,2 m, pod nimi se nachází středně plastické kvarterní hlíny (spraše), které se ve výrobě také využívají. Mocnost této vrstvy se pohybuje od 0,5 do 3,0 m. Bez využití je vrstva dělicí spraš od jílové suroviny, která je tvořena zahliněnými šterky. Ty jsou postupně ukládány na haldy a budou použity k zasypání vytěženého prostoru při rekultivaci na konci životnosti výrobního závodu. [6] [8]

2.3.1.1 Jíly T14

Užitkovou surovinu v této lokalitě tvoří neogenní jíly, které jsou v geologických rozbořech označovány jako jíly T14. Jejich obsah v surovinové směsi se běžně pohybuje od 40 do 50 % dle vyráběného sortimentu. Charakteristické jsou svou jemností. Množství hrubé frakce (nad 2 mm) nepřesahuje 0,6 %, což je prakticky bezvýznamné. Velikost prachových zrn o velikosti 0,02 – 0,06 mm je také zastoupena v poměrně malém množství od 4 do 8 %. Nejdůležitější je však 40 až 50 % podíl jílové složky s frakcí pod 0,002 mm. Společně s velkým množstvím rozdělovací vody (35–40 %) způsobuje tento fakt dobrou plasticitu jílové suroviny. Hodnota smrštění sušením i výpalem (950 °C) je v případě jílu T14 vysoká cca od 8 do 11 %, resp. 10–13 %. Zvýšené jsou také hodnoty nasákavosti po výpalu, v průměru okolo 16 %. Střep vykazuje poměrně nízkou objemovou hmotnost 1710–1770 kg·m⁻³ a zároveň vysokou pevnost v ohybu, většinou nad 15 N·mm⁻². [6] [8]

Z chemického hlediska jíly T14 obsahují oxidy, které jsou uvedeny v tabulce č. 2 včetně jejich procentuálního zastoupení.

Tabulka 2. Zastoupení oxidů v jílech T14

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O
Podíl (hm. %)	53,6	12,7	5,1	8,3	2,9	2,8

V množství menším než 1 % jsou zastoupeny také TiO₂, Na₂O, SO₃. [18]

Z mineralogického hlediska je základem jílu T14 illit [(KH₃O)Al₂(SiAl)₄O₁₀(OH)₂] s velmi malou příměsí montmorillonitu [(Ca, Na)MgAl₂(Si₄O₁₀)(OH)₂ ± nH₂O]. Z celkového množství SiO₂ se ve volné formě nachází jen 18,03 %, zbytek je vázán ve složitějších sloučeninách. Mimo tyto základní složky obsahuje jílová zemina také významné množství CaCO₃ (13–19 %), což způsobuje vznik výkvětů po styku s vodou a následném vysušení. Nezvykle vysoký podíl 1 % zaujímají organické látky. [18]

2.3.2 Spraš

Spraš je zvětralá hornina navátá větrem, ve které mají nadpoloviční zastoupení prachové částice křemene, živců a slíd. Zbytek tvoří jemný písek a jíly. V cihelně v Jezernici je spraš používána ve směsi s jílovou zeminou jako hlavní složka výrobní suroviny některých výrobků. Její přídavek do cihlářského těsta se pohybuje okolo 10 % a přináší několik výhod.

Protože je ve spraši značné zastoupení částic větších, než se běžně vyskytují v jílech, působí ve směsi jako ostřívo a umožňuje lépe uvolňovat vodu ze surových výrobků. Díky přítomnosti živců, slíd a křemene spraš působí také jako aktivní slinovací složka, zvyšující pevnost v tlaku. Kromě těchto důležitých změn mechanických vlastností působí přídavek

spraše i na estetickou stránku výrobku. Žlutohnědá barva horniny v těženém stavu je způsobena oxidy a hydroxidy železa, které při výpalu způsobují klasické cihlově oranžové zabarvení. [6] [8]

Zásoby této cenné suroviny jsou bohužel velmi omezené v poměru k množství základních jíílů, jsou tedy využívány výhradně na výrobu zboží s vyššími nároky na pevnost, které tvoří menší podíl celkové produkce závodu.

2.3.3 Dřevěné piliny

Další ze složek přidávaných do výrobní směsi v přibližně 20 % zastoupení jsou dřevěné piliny, které v technologii výroby plní několik funkcí. Ve fázi sušení zlepšují vedení vlhkosti k povrchu a ovlivňují smrštění surového výlisku. Jakmile dojde v peci k zahřátí na přibližně 300 °C, dřevo začne hořet. Spalováním je uvolňováno teplo do prostoru pece, což snižuje spotřebu zemního plynu spalovaného v hořácích pece. Dřevěné piliny tedy slouží současně jako ostřívo a palivo. Dutiny vzniklé vyhořením dřeva zvyšují pórovitost, s čímž je pevně spjata snížení objemové hmotnosti. Díky tomuto jevu působí dřevěné piliny také jako lehčivo.

Komplikací při použití dřevěných pilin je různorodost vlastností dováženého materiálu od externích dodavatelů. Různá je vlhkost i druh dřeva vstupujícího do výrobního procesu ve formě pilin. [8]

2.3.4 Struska

Struska působí v cihlářském těstě především jako ostřívo, ale také jako palivo a lehčivo. Strusky jsou ve výrobním závodě používány teplárenské a elektrárenské od několika různých dodavatelů. Struska z černého uhlí dodávaná do závodu v Jezernici se vyznačuje vysokou, ale velmi nestabilní hodnotou nedopalu (až do 25 %). Výhodou je její vyšší výhřevnost, delší doba vyhořívání a také vyšší teplota spalování. To má za následek lepší využití tepla, které vzniká dále v tunelové peci a může být po cestě do odtahu do komínu lépe využito. [8]

Hnědouhelná varianta je typická svou nízkou, ale stabilní hodnotou nedopalu a nižší teplotou hoření. Výhodou je rychlejší vznícení a lepší regulace hoření v peci.

Podle typu výrobku se do výrobní směsi přidává 7–10 % strusky.

2.3.5 Písek

Písek ve směsi působí jako ostřívo a do výrobní směsi je ho přidáváno 10–14 %. V cihelně v Jezernici se využívá podsítný podíl z výroby šterků v okolních kamenolomech. Ve všech třech lokalitách se těží kvalitní kamenivo tvořené moravskou drobou vyznačující se vysokou tvrdostí. Pro použití v cihlářské výrobě je výhodné použití písku s nižším obsahem křemíku, který způsobuje rychlé opotřebávání zařízení přicházejících do styku se surovinou, jako jsou například styčné plochy kolového mlýnu, stěny šnekového lisu, nebo brusné kotouče při finální úpravě povrchu cihel. [8]

2.3.6 Papírenské kaly

Do výrobní směsi jsou přidávány také kaly z výroby papíru, které zastávají několik úloh. Papír obsahuje různé složky, které postupně vyhořívají po prakticky celé délce předehřívacího a vypalovacího pásma pece. Při tom papír působí jako stabilní palivo a zapříčiňuje vznik pórů, čímž se vylehčuje střep. Další výhodou této přísady je vyztužení tvarovky a lepší odvod vody k povrchu díky vláknitému charakteru materiálu. Tyto dvě vlastnosti omezují vznik trhlin při sušení. Běžný přírůstek do směsi činí 5–8 %, v případě nedostatku suroviny však existují i receptury, ve kterých se s papírenskými kaly nepočítá vůbec. [8]

2.3.7 Brusný prach

Do některých typů surovinové směsi je přidáván brusný prach, který vzniká jako odpad při broušení cihel. Tvoří jej drobné prachové částičky cihlového střepu a z velmi malé části také brusný materiál odpadávající z brusných kotoučů při jejich namáhání. Recyklace brusného prachu ve směsi je poměrně novým technologickým krokem, který ještě není zcela zvládnut. Do směsi se v současnosti přidává okolo 3 % prachu a hlavním významem je úspora běžného materiálu a řešení otázky, jak nakládat s tímto odpadem ve formě jemného prášku. [8]

2.3.8 Voda

Vodu, jako surovinu při výrobě cihlových tvarovek, nelze opomenout. Její množství může mít, i při zachování stejného poměru všech ostatních surovinových složek, zásadní vliv na chování výrobní směsi především při lisování, sušení a pálení. Množství vody přidávané do výrobní směsi závisí na tom, jaká je momentální vlhkost suroviny na haldě, která je vystavena povětrnostním vlivům. Relativní vlhkost jílu se v průběhu roku pohybuje mezi 15 a 19 %.

Vlhkost je upravována přidávkou vody během mletí suroviny v přípravně tak, aby měl výsledný mix směrující do odležárny vlhkost přibližně 20 %. Při nasazení do výroby je dále směs propařována v kruhovém mísidle před vstupem do šnekového lisu, kde je možné přidat další vodu. Požadovaná vlhkost při lisování je cca 21 %. [8]

3 TECHNOLOGIE VÝROBY

V této části je popsána technologie výroby cihel v závodu Wienerberger cihelna Jezernice s.r.o., pro kterou jsou určeny poznatky zjištěné v rámci tvorby této diplomové práce. Od okamžiku naplnění skříňových podavačů obsluhou kolového nakladače je výroba plně automatizována. Operátoři jednotlivých výrobních úseků však mohou prostřednictvím ovládacích panelů zasahovat do procesu a provádět regulaci dle aktuálních podmínek a optimalizovat tak výrobu. Stroj přímo řízený lidskou rukou do procesu opět zasahuje až na samotném konci, kdy jsou palety s naloženým a zabaleným zbožím expedovány vysokozdvizným vozíkem na sklad.

3.1 Těžba surovin

Cílem tohoto procesu je získání hlavní složky surovinové směsi pro výrobu cihlových bloků – jílu. Surovina musí splňovat určité požadavky, které si společnost určila.

- Jílová surovina nesmí obsahovat nežádoucí příměsi ornice, šterku, kamenů, popř. dřeva z výztuže vrtů
- Granulometrie musí odpovídat daným limitům podílu jednotlivých frakcí.
 - 17–59 hm. % frakce $> 20 \mu\text{m}$
 - 14–54 hm. % frakce od 2 do $20 \mu\text{m}$
 - 20–36 hm. % frakce $< 2 \mu\text{m}$
- Objemová hmotnost musí být nižší než $1700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
- Smrštění suroviny musí být do 9 %
- Vlhkost těžené suroviny se musí pohybovat v rozmezí od 14 do 18 %

Jíl je těžen rýpadlem z jednotlivých etáží hliniště (viz obr. 2) a nakládán na dumpéry, které jej vyvážejí na haldu. Halda se dle momentální potřeby člení na několik částí tak, aby bylo vždy možné současně odebírat odleželou surovinu a navážet novou. Díky tomuto systému může být jílová zemina vystavena povětrnostním vlivům po delší dobu, což napomáhá k její homogenizaci, zvětrávání a rozpojení jemných zrn jílu vlivem srážkové vody. Tím jsou zajištěny optimální podmínky směsi pro výrobu.



Obr. 2. Hliniště

Navážení na haldu probíhá v závislosti na klimatických podmínkách tak, aby zásoba jílu vždy dosahovala minimálně 50000 m³ a bylo tak možné překlenout případné období deštivých nebo mrazivých dnů, kdy těžba není možná. [5] [8]

3.2 Skladování surovin a přísad

Skladování surovin a přísad musí probíhat tak, aby nedošlo ke vzájemné kontaminaci jednotlivých druhů.

Pro každou surovinu a přísadu (jíl, spraš, písek, dřevěné piliny, struska, papírenské kaly, brusný prach) je v závodě vyhrazeno skladovací místo (viz obr. 3) a skříňový podavač, kterým je konkrétní surovina dávkována do výrobního procesu. Jílová surovina je uložena na haldě s celkovou kapacitou až 110000 m³ a je přípustné částečné smísení navážené a odebírané zeminy. Dřevěné piliny jsou skladovány odděleně pod přístřeškem pilinového hospodářství a v nekrytém betonovém ohradníku. Papírenské kaly mají svůj vlastní krytý box oddělený betonovou stěnou tak, aby nemohlo dojít ke smísení s pilinami zavátím větrem. Struska a písek jsou skladovány volně na hromádách na zpevněných plochách odděleně od sebe. [5] [8]



Obr. 3. Zleva halda s pilinami a se struskou

3.3 Přípravna

Než je surovina připravena na samotou výrobu, musí projít procesem, který jí udá požadované vlastnosti.

3.3.1 Dávkování jílu a přísad

Dávkování probíhá prostřednictvím skříňových podavačů (viz obr. 4) objemově. Správný poměr přísad je regulován výškou hradítka ve výstupním otvoru podavače a rychlostí pásu, na kterém surovina vyjíždí ven. Každé surovině je přiřazen konkrétní skříňový podavač, aby nedocházelo ke vzájemnému znečištění.

Čidla snímající výšku hladiny vylučují přípravu směsi bez přítomnosti některé z potřebných surovin.



Obr. 4. Skříňové podavače

3.3.2 Homogenizace a drcení

K prvotní homogenizaci dochází již při samotné těžbě a manipulaci s materiálem na haldách.

Ze skříňových podavačů směs pokračuje do kolového mlýnu, kde je protlačována tlakem těžkých kol skrz děrované rošty do prostoru talířového sběrače. V případě potřeby může být přidávána voda. Sběrač vyhrnuje směs na pásový dopravník, který ji přivede nejprve mezi hrubé válce do mezery o velikosti 2–3 mm a následně do druhého mlýna s jemnými válci, kde se velikost štěrbin pohybuje od 1,0 do 1,8 mm. Tímto způsobem rozemletá a homogenizovaná surovina putuje do velkoobjemových, železobetonových boxů v odležárně (viz obr. 5), do kterých je sypána z výšky 1,5 – 12,0 m, dle aktuálně zasypané výšky, čímž dochází k dalšímu promíchávání (viz obr. 6). Takto je surovina skladována obvykle 3 až 6 dní, poté je z odležárny odebrána korečkovým bagrem a je pásovými dopravníky dopravována do mísidla před vakuovým lisem, ve kterém dochází za neustálého propařování k protlačování suroviny přes síta. Takto homogenizovaná a prohřátá směs je připravena na lisování surových výlisků. [5] [8]



Obr. 5. Přípravna (v popředí kolový mlýn)



Obr. 6. Velkoobjemové boxy a korečkový bagr v odležárně surovin

3.4 Lisování a nakládání na sušárenské vozy

Cílem lisování je dodat materiálu požadovaný tvar a hutnost tak, aby výsledný produkt odpovídal normám pro pálené zdicí prvky.

Surovina je pod tlakem $1,60 - 1,95 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ vytlačována ze šnekového lisu přes formu, která vytváří ve výlisku dutiny charakteristické pro moderní cihlové bloky (viz obr. 7). Každý druh sortimentu má vlastní typ formy s vhodným uspořádáním. Komora lisu je vakuována, aby byl zajištěn odchod přítomného vzduchu ven z těsta.



Obr. 7. Šnekový lis za chodu

Tlak může být regulován množstvím přidávané vody a páry do kruhového mísidla nebo přímo do lisu. Z ústí lisu vychází souvislý pás výlisku, který je tzv. odřezávkem dělen pomocí struny na jednotlivé bloky. Ty jsou dále unášeny pásovým dopravníkem, na jehož konci je robotický

manipulátor, který bloky ukládá na ocelové latě, které putují do sušárenských vozů (viz obr. 8). [5] [8]



Obr. 8. Robotický manipulátor překládající nasekané bloky na ocelové latě (vlevo v pozadí sušárenské vozy)

3.5 Sušení a překládání na pecní vozy

Úkolem sušení je odstranění přebytečné vody ze surových cihel, která by způsobila mechanické poškození materiálu při svém vypařování, kdyby bloky putovaly přímo do pece s vysokou teplotou. Aby sušení probíhalo optimálně, je potřeba zajistit správnou teplotu a proudění sušicího vzduchu v sušárně.

Sušení probíhá ve třech specifických fázích. V první z nich je smrštění výlisku úměrné snižování obsahu vody. Ta se odpařuje zatím jen z povrchu a je velmi závislá na proudění vzduchu v sušárně a také na jeho teplotě a vlhkosti. Ve druhé fázi pokračuje smršťování a přidává se zvětšování objemu pórů. Na konci této fáze je ve výrobku jen tolik vody, že už od sebe neodděluje jednotlivé částice materiálu, ty se začnou dotýkat a výlisek se přestane smršťovat. Tento okamžik se nazývá **kritický bod sušení**. V poslední fázi dochází k odpařování vody z pórů výlisku, čímž se zvětšuje jejich objem. Protože už dále neprobíhá smršťování, nemá rychlost sušení vliv na vznikající vady. [1] [7] [8]

Významnou roli hraje teplota sušicího vzduchu. Ten je schopen s rostoucí teplotou pojmout více vlhkosti. Tato změna je poměrně velká. Například 1 m³ vzduchu o relativní vlhkosti 100 % a teplotě 0 °C pojme 3,8 g vody, při teplotě 25 °C pojme 22,5 g a při teplotě 50 °C už 82,3 g vody. Úměrně s pohlceným množstvím vody proto klesá potřebné množství sušicího vzduchu, kterého je tedy při 50 °C potřeba až 20x méně, než kdyby sušení probíhalo za teploty 0 °C. [2] [8]

Během procesu sušení dochází k zásadní změně plastického těsta na tuhý materiál. Jak postupuje vnitřní hladina vody v materiálu, vznikají postupně tahová a tlaková napětí. Překročí-li tato napětí mez pevnosti materiálu v příslušném stavu, dojde k nežádoucímu porušení. Z tohoto důvodu je potřeba optimalizovat rychlost sušení v první a druhé fázi tak, aby ke vzniku

trhlin docházelo co nejméně. Rychlost sušení (g_I) je závislá na rozdílu parciálních tlaků vodní páry na povrchu výlisku a vzduchu a lze ji vyjádřit následujícím vzorcem. [1] [8]

$$g_I = \frac{\beta}{R_D \cdot T} \cdot (p_p - p_{vz}) \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}) \quad (1)$$

kde β je číslo látkového přestupu (1)

R_D – plynová konstanta vodní páry ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

T – termodynamická teplota (K)

p_p – parciální tlak vodní páry na povrchu výlisku (Pa)

p_{vz} – parciální tlak sušícího vzduchu (Pa)

V praxi se někdy používá koeficient citlivosti k sušení TE_B dle Bigota, který je jednoduše zjištělný a lze jej vypočítat dle vztahu:

$$TE_B = \frac{W_0 - W_k}{W_k} \quad (1) \quad (2)$$

kde W_0 je počáteční vlhkost (1)

W_k – kritická vlhkost (vlhkost, která již dále neovlivňuje smrštění) (1)

Podle hodnoty koeficientu citlivosti k sušení rozlišujeme 4 typy surovin:

- $TE_B < 1$ - málo citlivé
- $TE_B \in (1; 1,5)$ - středně citlivé
- $TE_B \in (1,5; 2)$ - citlivé k sušení
- $TE_B > 2$ - velmi citlivé k sušení

V cihelně v Jezernici proces sušení probíhá v tzv. turbosušárně se dvěma kanály. V každém z nich je 42 sušárenských vozů celkem tedy sušárna operuje s 86 kusy. Vzduch pro sušení je přiváděn z chladicího pásma pece do vzduchotechnického rozvodu sušárny pomocí dvou radiálních ventilátorů, které zajišťují průtok vzduchu $200000 \text{ Bm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (B na začátku jednotky značí, že daný objem vzduchu je uvažován za pracovního tlaku). V potrubí jsou instalovány 4 hořáky o celkovém výkonu 5,2 MW, které vyrovnávají případný nedostatečný tepelný výkon horkého vzduchu z pece. V kanálech sušárny se nachází 37 radiálních ventilátorů, které mají za úkol prohánět přivedený horký vzduch skrz cihly umístěné na vozech.

Sušicí křivka se nastavuje systémem klapky na rozvodných kanálech sušárny. Teplota směrem od začátku ke konci sušárny postupně narůstá z přibližně 50°C až na nejvyšší hodnotu okolo 125°C . Proces probíhá automaticky a je řízen prostřednictvím softwaru na velínu pece. Každý typ sortimentu má svůj vlastní sušicí program, kterým se řídí režim sušení. Na konci procesu sušení by měly surové cihly obsahovat nejvýše 2–3 % vlhkosti, dle druhu zboží.

Překládání vysušených cihel, tzv. výsušků, ze sušárenských vozů na vozy pecní zajišťují opět robotické manipulátory. Obsluha překladiště každé 2 hodiny porovnává hmotnost,

rozměry a kvalitu kontrolních výsušků s předepsanými hodnotami. Pokud nastane nepřijatelná odchylka, je třeba provést zásah do nastavení lisu nebo sušárny, případně do obojího. [8]

3.6 Výpal

Výpalem dodáváme materiálu konečné vlastnosti. Na jeho konci musí cihlové bloky splňovat požadavky na objemovou hmotnost, pevnost v tlaku, pórovitost, nasákavost, vzhled, výskyt vad atd.

Výpal v cihelně v Jezernici probíhá v kontinuálně pracující tunelové peci (viz obr. 9) o délce 126,15 m, vnitřní šířce kanálu 5,70 m a vnitřní výšce 2,74 m. V praktickém provozu je možno v peci vypálit až 790 tun pálené hmoty každých 24 hodin.

Pec je osazena 212 kusy hořáků na zemní plyn a vzduchotechnikou zajišťující přívod spalovacího vzduchu do hořáků, chlazení podvozků pecních vozů a skládky na konci pece a také proudění horkých spalin a jejich odvod z pece. Pálicí křivka a nastavení všech zařízení pece je ovládáno řídicím softwarem na velínu. Prvních 6 hořákových skupin z celkových 18 slouží k postupnému předehtřívání materiálu a nástupu na požadovanou vypalovací teplotu. Ta je buď 805 °C pro standardní zboží, nebo 840 °C pro zboží vyšší pevnosti.

Na vytápění pece se z podstatné části kromě plynových hořáků podílí také teplo vzniklé spalováním paliv zalisovaných ve výrobní směsi. Celkový teplotní režim lze tedy regulovat nejen dobou chodu hořáků a jejich nastavením, ale také množstvím zalisovaného paliva ve směsi a tahovými podmínkami uvnitř pece, které lze ovlivnit změnou otáček ventilátorů odtahů plynů z pece.



Obr. 9. Výstupní vrata tunelové pece

Již při teplotách okolo 300 °C dochází k prvním chemickým reakcím. Konkrétně k vyhořívání dřevěných pilin a organických složek papírenských kalů za přítomnosti kyslíku. Tím dochází ke snižování objemové hmotnosti doprovázenému zvyšováním pórovitosti střepu. Ta je zvyšována také chemickými reakcemi minerálů a výparem zbytkové fyzikálně vázané

vody ve výsušcích. Chemicky vázaná voda se z jílových minerálů uvolňuje při teplotách od 450 do 750 °C. [8]

Jelikož výpal za běžných podmínek probíhá v teplotách nižších než 1000 °C, ve střepu se neobjevuje skelná fáze, a tudíž všechny zpevňovací procesy probíhají ve fázi tuhé v malé kontaktní oblasti. Díky poměrně nízké teplotě dochází běžně při výpalu pouze k jedné významné modifikační přeměně. Tou je přeměna α -křemene na β -křemen, která začíná při 573 °C. V tomto případě není objemová změna nijak dramatická, daleko větší smrštění však nastává při teplotě 870 °C, kdy se mění β -křemen na α -tridymit. I této teploty může být při výpalu dosaženo vyhoříváním spalitelných látek uvnitř skládky, kde není dostatečné proudění na to, aby materiál ochladilo. Když k tomuto jevu dojde, je často doprovázen vznikem nežádoucích trhlin ve stěnách cihel. [1] [8]

3.7 Broušení

Broušením cihlových bloků ze stran děrování se zvyšuje rozměrová přesnost hotových výrobků. To umožňuje přesnější zdění staveb a snížení množství pojiva potřebného ke spojování jednotlivých cihel.

Broušení probíhá ve dvou stupních pohybem bloků mezi dvěma páry kotoučů s diamantovými brusnými segmenty. Ty provedou bezprostředně po sobě dva úběry materiálu, čímž dojde k vyhlazení plochy a zpřesnění rozměrů ložných ploch.

Během toho procesu vzniká velmi jemný cihlový prach, který musí být neustále odsáván ze skříně brusky a potrubím dopravován do sil, ve kterých je skladován do doby, než je zpracován zpět ve výrobě. [8]

3.8 Třídění

Na výjezdu z brusky provádí průběžně obsluha linky vizuální kontrolu, třikrát za směnu také kontrolu hmotnosti a pravoúhlosti výrobků. Nevyhovující zboží shazuje z pásu do šachty dopravníku, který zmetky dopraví do sběrného kontejneru. Ten je vyvážen obsluhou vysokozdvizného vozíku na haldu k tomu určenou.

3.9 Balení, skladování a expedice

Cihly, které projdou výstupní kontrolou, ukládací stroj urovná na palety a balicí linka celou paletu s cihlami zataví do fólie. Paleta je opatřena etiketou s informacemi o výrobku a na řetězovém dopravníku opouští halu. Odtud je zboží odváženo na určené místo do skladu, který představuje velká zpevněná plocha přiléhající k výrobní hale (viz obr. 10). V tuto chvíli jsou palety s cihlami připraveny k prodeji zákazníkovi.



Obr. 10. Sklad zboží

3.10 Kontrola hotových výrobků

Vyráběné cihlové bloky musí být zkoušeny, aby bylo možné zjistit, zda jsou v souladu s kritérii normy ČSN EN 771-1+A1 pro zdicí prvky, případně aby splňovaly přísněnou podnikovou normu.

Pro každý druh výrobků existuje plán kontroly, který popisuje metodiku zkoušení, kritéria přijetí a četnost zkoušek. Kromě orientační rozměrové kontroly za bruskou je přímo z pecních vozů odebíráno 6 kusů cihel z každé výrobní série. Na těchto vzorcích se kromě rozměrů (EN 772-16), prověřuje objemová hmotnost celého stavebního prvku a materiálu prvku (EN 772-13), posuzuje se četnost prasklin a jejich charakter a také tvar a uspořádání děrování (EN 772-16). Dále je měřen poměrný objem otvorů (EN 772-3) a pevnost v tlaku (EN 772-1+A1). Průběh všech zkušebních metod je předepsán v uvedených normách a musí být zdokumentován formou zprávy o zkoušce. [8]

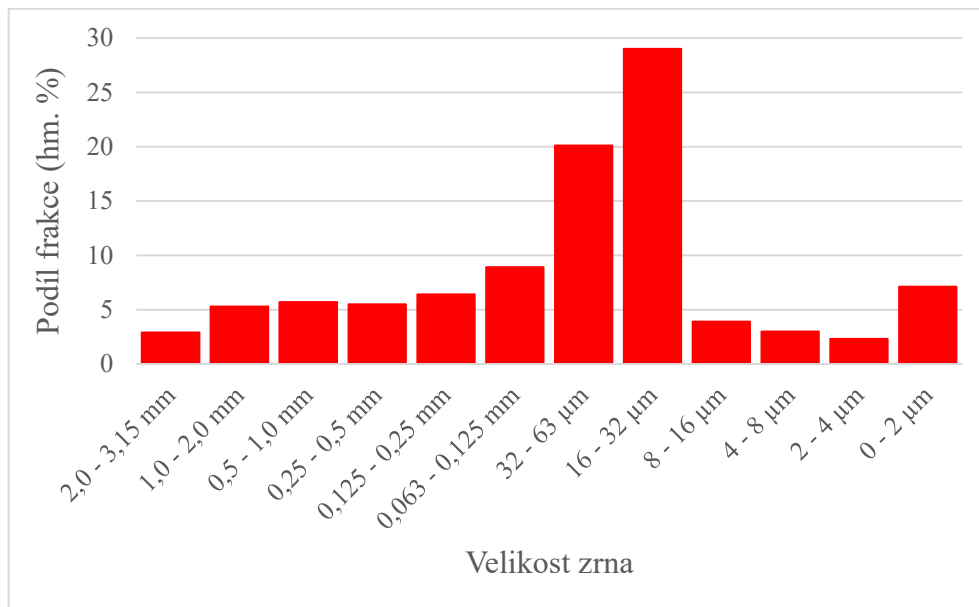
4 STUDIUM RECYKLACE BRUSNÉHO PRACHU

Experimentální část diplomové práce se zabývá studiem recyklace brusného prachu zpět do výrobní směsi v cihelně v Jezernici patřící do společnosti Wienerberger cihlářský průmysl, a.s. Z poznatků zjištěných při laboratorním výzkumu jsou vyvozeny praktické dopady na skutečnou výrobu cihlových zdicích prvků.

4.1 Problematika recyklace

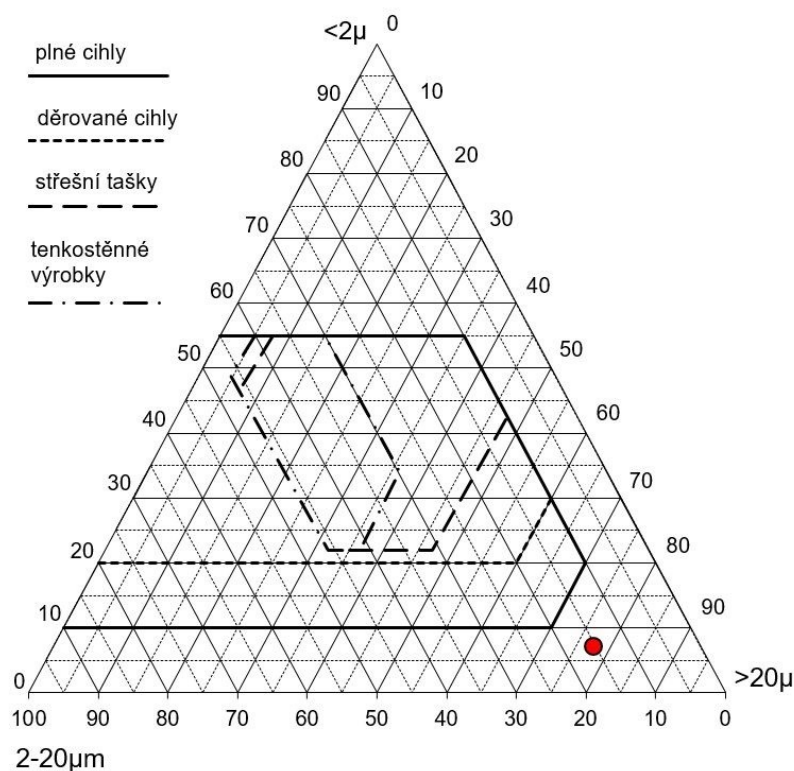
Trendy ve stavebním průmyslu jasně ukazují na zvyšující se zájem zákazníků o broušené cihlové bloky na úkor nebroušených. Broušení totiž umožňuje dosažení lepší rozměrové přesnosti, díky které je možné zdít na velmi tenkou vrstvu malty (po dosednutí bloku jen cca 1 mm), nebo na polyuretanovou pěnu, neboť není třeba vyrovnávat rozměrové nepřesnosti cihel vrstvou malty. Použití broušených cihel je tedy logickým krokem vedoucím ke značnému urychlení a zpřesnění stavby domů.

Pro výrobce cihlových bloků to však znamená nejen nové náklady na technologii broušení, ale vzniká také nová otázka, jak nakládat s brusným prachem, který při výrobě vzniká jako odpadní materiál. Jeho frakce je velmi jemná, okolo 65 hm. % materiálu má velikost zrna menší než 63 μm . To je patrné z výsledků síťového rozboru a rozboru sedimentačního (metoda Casagrande) (viz obr. 11). Takový materiál z hygienických důvodů nelze skladovat volně. Je třeba zabránit vysoké prašnosti, což přináší další náklady např. na zavlažování, transport v uzavřených nádobách apod. [9]



Obr. 11. Histogram zrnitosti brusného prachu

Granulometrie je patrná také z Winklerova diagramu (viz obr. 12), ve kterém červeně vyznačený bod v pravém spodním rohu trojúhelníku, odpovídající naměřené granulometrii, ukazuje, že velikost převažující většiny částic brusného prachu je skutečně velmi malá. Skladba zrnitosti se přibližuje jílovým zeminám používaným pro méně kvalitní stavební keramiku plných cihel. [9]



Obr. 12. Diagram zrnitosti brusného prachu [9]

Cihelna v Jezernici je velmi výkonný závod, který dokáže vyprodukovat až 20 tun prachu z broušení každý den. Také proto je jedním z prvních závodů v České republice, který se začal aktivně zabývat recyklací prachu zpět do výroby.

V současné době je prach dávkován ze zásobních sil buď již ve fázi mletí směsi do zásobních boxů, nebo až těsně před vstupem do lisu, a to výhradně do výrobků, u kterých je prakticky ověřeno, že přídavek prachu nemá podstatný negativní dopad na deklarované vlastnosti. V obou případech se prach přidává nad rámec vlastní receptury a není započítán do procentuálního zastoupení jednotlivých artiklů. Množství prachu dodávaného do směsi se reguluje jen na základě empirických poznatků a je řízeno pouze rychlostí otáčení šnekových dopravníků. Proto podíl prachu ve směsi není zcela přesně určen, ale z hrubých provozních výpočtů je patrné, že jeho zastoupení ve směsi se běžně pohybuje okolo 3–4 obj. %.

Rovněž dopady přídavku prachu na sledované vlastnosti výrobků jsou spíše jen odhadovány z praktických pozorování, jelikož si výrobní závod nemůže při svém vytížení dovolit experimentovat za hranou únosné kvality zboží. Aby bylo možné dále proces recyklace brusného prachu zlepšovat a odhalit jeho limity, je třeba provést laboratorní výzkum, který dokáže přesněji a prokazatelně odhalit chování směsi při výrobě cihlových bloků.

Tato diplomová práce se zabývá právě laboratorním studiem vlivu přídavku brusného prachu do výrobní směsi na sledované vlastnosti zboží a na jejím základě je možné dále rozvíjet technologii recyklace brusného prachu. Je možné například odhadnout maximální přípustný obsah prachu v surovině, záměrně ovlivňovat sušicí vlastnosti výlisků, jasně určit, pro které výrobky není přídavek prachu vhodný apod.

4.2 Experiment

Úkolem experimentu bylo zjistit vliv přídavku brusného prachu do surovinové směsi na výslednou objemovou hmotnost, objemové smrštění, nasákavost, zdánlivou pórovitost, ztrátu hmotnosti pálením a pevnost v tlaku.

Tvar zkušebních těles byl zvolen s ohledem na laboratorní podmínky poskytnuté pro experiment. Jako vhodný tvar zkušebních vzorků byl vybrán válec o průměru 35 mm, vyroben lisováním cihlářského těsta do ocelové formy za pomoci laboratorního lisu Brio. Na základě provozních parametrů technologického procesu výroby cihlářského zboží musel být pro laboratorní podmínky přizpůsoben nejen tvar zkušebních těles, ale také lisovací síla.

4.2.1 Volba lisovací síly

Jako výchozí lisovací síla, byla zvolena teoreticky vypočítaná hodnota, která vychází z provozního tlaku vakuového šnekového lisu, na kterém jsou vyráběny cihly ve skutečném provozu. Dosahovaný tlak v zařízení je průměrně 17 bar = 1700000 Pa. Ze vzorce pro výpočet tlaku

$$P = \frac{F}{S} \quad (\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}) \quad (3)$$

vyplývá:

$$F = P \cdot S \quad (\text{N}) \quad (4)$$

$$F = 1700000 \cdot \frac{\pi \cdot 0,035^2}{4} = 1635,59 \quad (\text{N})$$

kde F je síla (N),

S - plocha podstavy zkušebního válečku (mm^2).

Teoreticky vypočtená hodnota lisovací síly pro váleček o průměru 35 mm se tedy rovná 1635,59 Pa. Při výrobě vzorků byla použita přibližná hodnota, jelikož není technicky možné na použitém lisu zastavit pohyb přesně při této hodnotě.

Jako rozhodující parametr pro další tvorbu zkušebních těles byla zvolena dosažená objemová hmotnost páleného střepu. Snahou bylo co nejvíce se přiblížit hodnotě odpovídající normě pro pálené zdící prvky, která stanovuje pro výrobky spadající do 1. jakosti objemovou hmotnost $1600 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ s možnou odchylkou $\pm 5 \%$. To odpovídá rozpětí hodnot $1520 \div 1680 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. [10]

V první fázi testu byly vyrobeny 4 vzorky (čísla I – IV) s postupně narůstající lisovací silou tak, aby bylo možné sestavit graf vývoje objemové hmotnosti v závislosti na lisovací síle a v tomto grafu vytvořit regresní křivku, díky které bude možné vypočítat potřebný lisovací tlak vzorků. Z prvních čtyř vzorků však nebylo možné vývoj jasně určit, proto byly vytvořeny dodatečné čtyři vzorky (V – VIII) s dalším nárůstem lisovací síly až po 46,22 kN.

Na obrázcích 13 a 14 je možné směrem zleva doprava viditelně rozpoznat, jak se s narůstající lisovací silou snižuje pórovitost vlhkých vzorků.



Obr. 13. Vlhké zkušební vzorky



Obr. 14. Vypálené zkušební vzorky

V tabulce 3 jsou uvedeny naměřené a vypočtené hodnoty vypálených zkušebních tělísek, ze kterých byly následně odvozeny lisovací podmínky vzorků pro zjištění materiálových vlastností.

Tabulka 3. Naměřené a vypočtené hodnoty pro volbu lisovacích podmínek

Vzorek č.	Hmotnost vzorku m_p	Výška vzorku v	Průměr vzorku d	Objem vzorku V_p	Lisovací síla F	$OH_{stř}$
Jednotka	(g)	(mm)	(mm)	(mm ³)	(kN)	(kg·m ⁻³)
I	62,93	51,08	33,77	45751,25	1,661	1375
II	66,43	52,11	33,75	46618,53	3,063	1425
III	72,11	55,89	33,76	50029,82	6,750	1441
IV	68,50	52,48	33,88	47311,92	9,280	1448
V	55,29	42,12	33,81	37815,39	18,870	1440
VI	61,50	47,61	33,80	42719,04	19,991	1462
VII	68,16	52,50	33,88	47329,95	30,180	1440
VIII	56,75	43,29	33,82	38888,82	46,220	1459

Výpočet objemové hmotnosti střepu ($OH_{stř}$) byl proveden dle normy ČSN EN 772-13 podle vztahu

$$OH_{stř} = \frac{m_p}{V_p} \cdot 10^6 \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}) \quad (5)$$

kde m_p je hmotnost suchého vypáleného vzorku (g),

V_p - objem suchého vypáleného vzorku (mm^3),

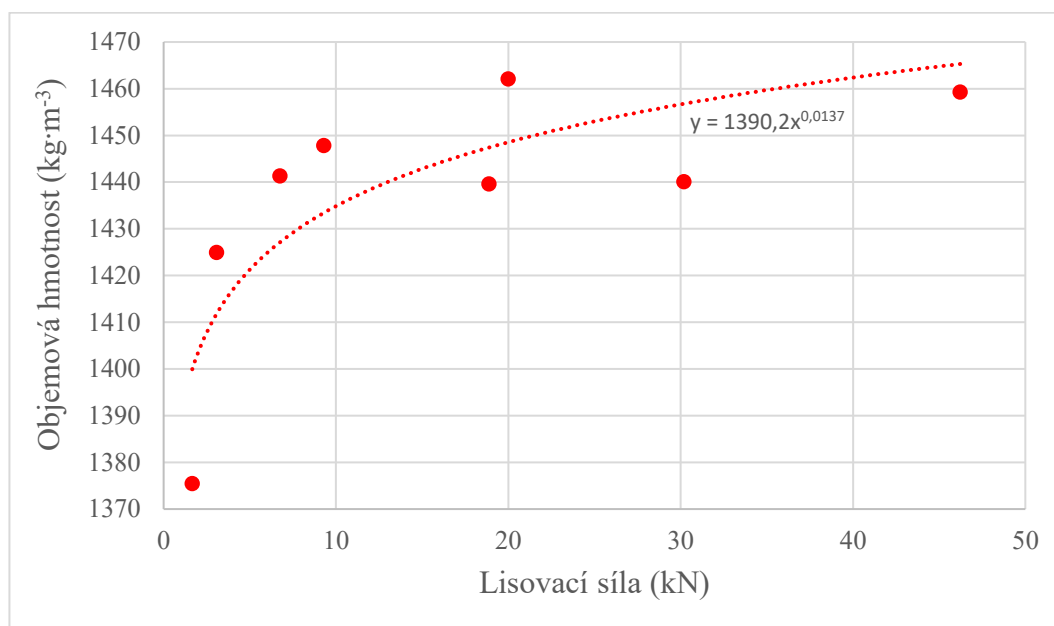
který se vypočte ze vztahu

$$V_p = v \cdot S = v \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (\text{mm}^3) \quad (6)$$

kde v je výška zkušební válečku (mm),

S - plocha podstavy zkušební válečku (mm^2). [11]

Z naměřených dat byla sestrojena křivka závislosti objemové hmotnosti střepu na lisovací síle vzorků (viz obr. 15), ta byla proložena mocninnou funkcí, která nejlépe popisuje reálné chování vzorků. Pomocí rovnice regresní křivky byl proveden teoretický výpočet síly, která je potřebná pro dosažení požadované objemové hmotnosti.



Obr. 15. Závislost objemové hmotnosti střepu na lisovací síle vzorku

Z vývoje nárůstu objemové hmotnosti v závislosti na lisovací síle je patrné, že při použití odlišné technologie lisování je třeba použít mnohonásobně vyšší tlaky, aby bylo dosaženo stejné objemové hmotnosti jako v praktických podmínkách. Nejpodstatnějším rozdílem je vakuování lisu v běžném výrobním procesu, které dokáže odstranit vzduchové bubliny ze směsi. Z experimentů a teoretických výpočtů se ukázalo, že skutečný vývoj objemové hmotnosti nejlépe popisuje právě mocninná funkce, která má následující rovnici.

$$y = 1390,2 \cdot x^{0,0137} \quad (1) \quad (7)$$

Z této rovnice byl odvozen vztah pro výpočet potřebné síly pro dosažení objemové hmotnosti $1600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

$$F = \left(\frac{OH_{stř}}{1390,2} \right)^{\frac{1}{0,0137}} \quad (\text{N}) \quad (8)$$

$$F = \left(\frac{1600}{1390,2} \right)^{\frac{1}{0,0137}} = 28\,554 \quad (\text{kN})$$

Tato lisovací síla je však daleko za hranicí možností lisu použitého pro výrobu zkušebních vzorků. Proto bylo rozhodnuto, že bude použit maximální dosažitelný tlak na zkušebním lisu – 160 kN. Zpětným výpočtem z rovnice regresní křivky bylo spočítáno, že za použití tohoto tlaku by mělo být dosaženo objemové hmotnosti okolo $1490 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, což je hodnota o přibližně 2 % nižší, než spodní hranice udávaná normou pro zařazení výrobku do 1. jakosti. Bylo vyhodnoceno, že tato hodnota je přijatelná pro uskutečnění a správné vyhodnocení daného experimentu.

$$OH_{stř} = 1390,2 \cdot 160^{0,0137} = 1490 \quad (\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}) \quad (9)$$

4.2.2 Příprava vzorků

Zkušební vzorky byly vyrobeny pro 4 různé podíly brusného prachu ve směsi. Z každé směsi bylo vyrobeno 6 vzorků, celkem tedy 24 vzorků. Z každého z nich byla spočítána objemová hmotnost střepu a objemové smrštění vzorků. Dále pak byly tři vzorky z každé receptury použity ke zjištění nasákavosti, ztráty pálením, zdánlivé pórovitosti a zbylé tři na měření pevnosti v tlaku.

Vlhkost jednotlivých směsí a přídavného brusného prachu byla před lisováním vzorků vždy změřena na automatických sušících váhách Denver Instrument IR 35.

4.2.2.1 Zkušební směsi

Základem zkoušených směsí je již namíchané a semleté cihlářské těsto připravené na výrobu cihel, odebrané z boxu odležárny v cihelně v Jezernici. Byla vybrána receptura, ze které se vyrábí největší podíl celoroční produkce závodu. Jednotlivé komponenty jsou do těsta dávkovány objemově ve vlhkém stavu v poměru uvedeném v tabulce 4, pro představu jsou uvedena také přibližně odpovídající hmotnostní procenta jednotlivých složek směsi. Vlhkost je v případě potřeby udržována přidávkou vody na požadovaných $21 \pm 1 \text{ hm. \%}$.

Tabulka 4. Složení základní surovinové směsi

Jíl	Písek	Struska	Dřevěné piliny	Papírenské kaly
53 obj. %	14 obj. %	8 obj. %	18 obj. %	7 obj. %
~ 64 hm. %	~ 21 hm. %	~ 6 hm. %	~ 4 hm. %	~ 5 hm. %

Brusný prach byl přidáván navíc do již hotové výrobní směsi tak, jak je momentálně dávkován i v cihelně v Jezernici. Obsahuje pouze čistý pálený cihlový střep a zanedbatelné množství materiálu z opotřebovaných brusných segmentů. Vlhkost je na velmi nízké úrovni –

dle naměřených hodnot 0,17 hm.%. Aby bylo možné pozorovat trendy ve vývoji vlastností, byly namíchány 4 receptury (A–D) s postupně se zvyšujícím podílem brusného prachu dle následující tabulky č. 5.

Tabulka 5. Testované receptury

Receptura	Hmotnost základní směsi (g)	Přídavek brusného prachu (g)	Podíl brusného prachu ve směsi
Jednotka	(g)	(g)	(hm. %)
A	1000	0	0,00
B	1000	30	2,91
C	1000	60	5,66
D	1000	90	8,26

4.2.2.2 Lisování vzorků

Směsi s požadovaným množstvím brusného prachu byly důkladně promíchány na laboratorní míchačce Hobart. Série prvních šesti vzorků určených pro experiment bez brusného prachu (číslo IX – XIV) byla vyrobena s různou navázkou, aby mohl být ověřen vliv rozdílné výšky a hmotnosti válečku na vlastnosti sledované v experimentu. Prokazatelný vliv nebyl zjištěn.

Ostatní vzorky již byly vyrobeny z navážky 86 g materiálu na každý vzorek. Takto připravená navážka byla nasypána do ocelového přípravku tvaru válce o průměru 35 mm a podrobena lisování o síle 160 kN a rychlosti zatěžování $1000 \text{ N}\cdot\text{s}^{-1}$. Při výrobě zkušebních těles dochází k drobné ztrátě materiálu ulpíváním na nástrojích a podobně, výsledná hmotnost vzorku tedy byla zpravidla mírně nižší než původních 86 g.



Obr. 16. Srovnání vzhledu vzorků s různým přídavkem prachu

Vzorky tvořené pouze základním mixem bez přídavku prachu vykazovaly nejvyšší vlhkost směsi. Barva, dle předpokladu odpovídala šedozelené barvě základní suroviny. Směs byla velmi plastická a „lepivá“. S navyšujícím se přídavkem brusného prachu do směsi se

razantně měnila její povaha. Směs se stávala podstatně více sypkou, klesala její plasticita, začaly se vytvářet drobné kuličky namísto kompaktního těsta a zabarvení postupně přecházelo přes světlejší hnědou až do oranžového odstínu (viz obr. 16).

Parametry právě vylisovaných zkušebních těles před sušením a výpalem jsou v následující souhrnné tabulce 6.

Tabulka 6. Parametry zkušebních těles po vylisování

Receptura A				Vlhkost směsi: 21,88 %
Vzorek č.	Lisovací síla N	Hmotnost vzorku m_v	Výška vzorku v	Průměr vzorku d
Jednotka	(kN)	(g)	(mm)	(mm)
IX	149,95	71,86	37,62	33,22
X	160,87	67,09	34,91	33,44
XI	161,04	84,81	44,07	33,41
XII	160,61	79,92	41,40	33,42
XIII	160,65	82,67	42,98	33,39
XIV	161,24	96,18	49,88	33,52
Receptura B				Vlhkost směsi: 20,87 %
XV	160,29	86,79	46,30	35,07
XVI	160,99	84,93	45,21	35,08
XVII	161,26	84,95	45,05	35,04
XVIII	160,85	84,82	45,06	35,06
XIX	160,49	85,07	45,38	35,02
XX	160,27	85,29	45,24	35,04
Receptura C				Vlhkost směsi: 20,09 %
XXI	160,41	84,90	44,96	35,16
XXII	160,71	85,10	45,03	35,12
XXIII	160,69	85,15	45,02	35,09
XXIV	160,49	84,55	44,67	35,13
XXV	160,41	85,04	44,74	35,13
XXVI	160,85	84,93	44,02	35,11
Receptura D				Vlhkost směsi: 20,57 %
XXVII	160,31	85,05	44,86	35,13
XXVIII	160,33	84,74	44,74	35,03
XXIX	160,53	84,81	44,72	35,13
XXX	160,85	85,23	45,00	35,09
XXXI	160,63	84,97	44,85	35,13
XXXII	160,71	84,86	44,69	35,12

4.2.2.3 Sušení vzorků

Sušení vzorků proběhlo v laboratorní horkovzdušné sušárně při teplotě 50 °C, vždy do stálé hmotnosti, po dobu minimálně 48 hodin. Následně byl u vzorků změřen průměr, výška a hmotnost.

4.2.2.4 Výpal vzorků

Režim výpalu byl nastaven tak, aby se podobal výpalu zboží vyráběného v největším objemu v kontinuálně pracující tunelové peci v cihelně v Jezernici. Z křivky výpalu byly odvozeny gradienty teploty a doba výpalu takto:

- Gradient náběhu na vypalovací teplotu nastaven na 2 °C/min – odpovídá přibližně době 6,5 hodiny
- Vypalovací teplota nastavena na 805 °C
- Výdrž na vypalovací teplotě nastavena na 5 hodin
- Volné chlazení

4.2.3 Výsledky experimentu

Na vzorcích bylo měřeno následujících pět parametrů dle příslušných státních norem pro zdící prvky za účelem zjištění vlivu přídatku brusného prachu do cihlářské směsi na tyto vlastnosti.

- Objemová hmotnost – ČSN EN 772-13 (květen 2001)
- Nasákavost – ČSN 72 1565 část 6 (srpen 1985)
- Zdánlivá pórovitost – ČSN 72 1565 část 6 (srpen 1985)
- Ztráta hmotnosti pálením – ČSN 72 1565 část 6 (srpen 1985)
- Pevnost v tlaku – ČSN EN 772-1+A1 (leden 2016)

V dalších kapitolách jsou uvedeny naměřené hodnoty a analyzován vývoj jednotlivých vlastností zkušebních vzorků.

4.2.3.1 Objemová hmotnost střepu

Na změnu objemové hmotnosti (dále jen OH) po přidání brusného prachu do směsi lze předem nahlížet několika různými způsoby, přičemž každý vede k jinému teoretickému závěru.

Jedním z nich je předpoklad, že dojde ke snížení celkové OH vzorku v důsledku nižší sypné OH prachu, který je do směsi přidáván. Toto tvrzení však jde proti úvaze, že OH samotného materiálu brusného prachu by měla být prakticky totožná s výsledným střepem, jelikož se jedná o prach z naprosto stejného materiálu jako je zbytek směsi, a tudíž by OH střepu vzorku neměla být při důkladném promísení se směsí prakticky vůbec ovlivněna. Dalším možným principem, který by se mohl eventuálně projevit je naopak nárůst OH v důsledku přidávání brusného prachu nad rámec vlastní receptury, čímž dochází ke snížení poměru lehčiv ve směsi. K navýšení OH by mohl přispět také fakt, že je brusný prach již prošel výpalem a je velmi jemný, takže má lepší schopnost zaplnit prostor, než větší částice písku, pilin, strusky apod.

Z hodnot naměřených při praktickém experimentu na vypálených vzorcích je jasné patrné, že přidávání brusného prachu do těsta nemá téměř žádný vliv na výslednou objemovou hmotnost. Naměřený rozdíl mezi jednotlivými recepturami je menší než 1 % vůči základní směsi bez prachu. Navíc zde není prokazatelný ani žádný jasný trend.

Naměřené hodnoty a výpočty dle vztahů (5) a (6) jsou uvedeny v tabulce 7.

Tabulka 7. Vývoj objemové hmotnosti vzorků

Vzorek č.	Receptura	Hmotnost m_p	Výška v	Průměr d	Objem V_p	$OH_{stř}$	Průměr $OH_{stř}$	Změna $OH_{stř}$
Jednotka	-	(g)	(mm)	(mm)	(mm ³)	(kg·m ⁻³)	(kg·m ⁻³)	%
IX	A	48,94	37,62	33,22	32606,78	1501	1499	0,00
X		45,72	34,91	33,44	30660,01	1491		
XI		57,93	44,07	33,41	38635,45	1499		
XII		54,68	41,40	33,42	36316,43	1506		
XIII		56,42	42,98	33,39	37634,76	1499		
XIV		65,92	49,88	33,52	44017,40	1498		
XV	B	60,05	44,84	33,62	39806,22	1509	1507	0,54
XVI		58,90	43,80	33,71	39091,43	1507		
XVII		59,24	43,76	33,88	39450,64	1502		
XVIII		59,13	43,66	33,86	39314,03	1504		
XIX		59,15	43,96	33,71	39234,23	1508		
XX		59,65	43,84	33,83	39406,19	1514		
XXI	C	59,67	43,91	34,12	40148,69	1486	1485	-0,95
XXII		59,83	43,89	34,21	40342,39	1483		
XXIII		60,12	43,96	34,29	40595,94	1481		
XXIV		59,66	43,64	34,20	40089,15	1488		
XXV		60,16	43,74	34,29	40392,77	1489		
XXVI		59,75	43,89	34,21	40342,39	1481		
XXVII	D	60,39	43,85	34,37	40683,53	1484	1487	-0,78
XXVIII		60,07	43,81	34,25	40363,08	1488		
XXIX		60,33	43,82	34,36	40632,04	1485		
XXX		60,24	43,93	34,25	40473,64	1488		
XXXI		60,33	43,81	34,30	40481,02	1490		
XXXII		60,29	43,72	34,35	40515,72	1488		

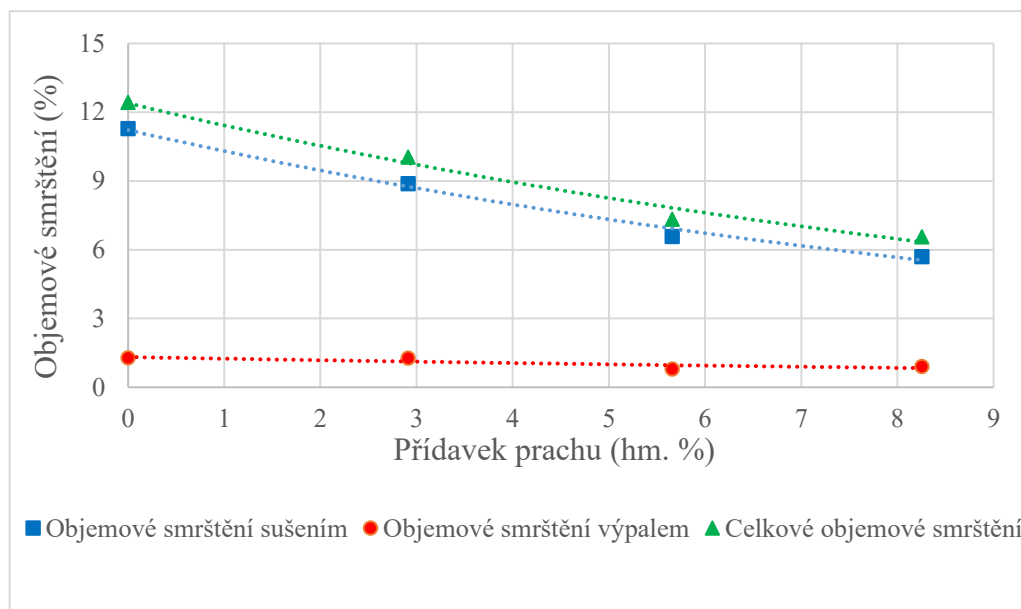
4.2.3.2 Objemové smrštění

Velikost objemového smrštění sušením a výpalem můžeme zjistit z objemu vlhkých V_v , suchých V_s a pálených vzorků V_p . Objem vzorků lze spočítat ze vzorce (6), smrštění je procentuálním vyjádřením úbytku objemu vzorku. Změřené a vypočítané hodnoty jsou uvedeny v tabulce 8.

Tabulka 8. Vývoj objemového smrštění

Receptura	Součet V_p	Součet V_s	Součet V_v	Objemové smrštění sušením	Objemové smrštění výpalem	Celkové objemové smrštění
Jednotka	(mm ³)	(mm ³)	(mm ³)	(%)	(%)	(%)
A	251069	222748	219871	11,28	1,29	12,43
B	262700	239347	236303	8,89	1,27	10,05
C	261062	243864	241911	6,59	0,80	7,34
D	260228	245382	243149	5,71	0,91	6,56

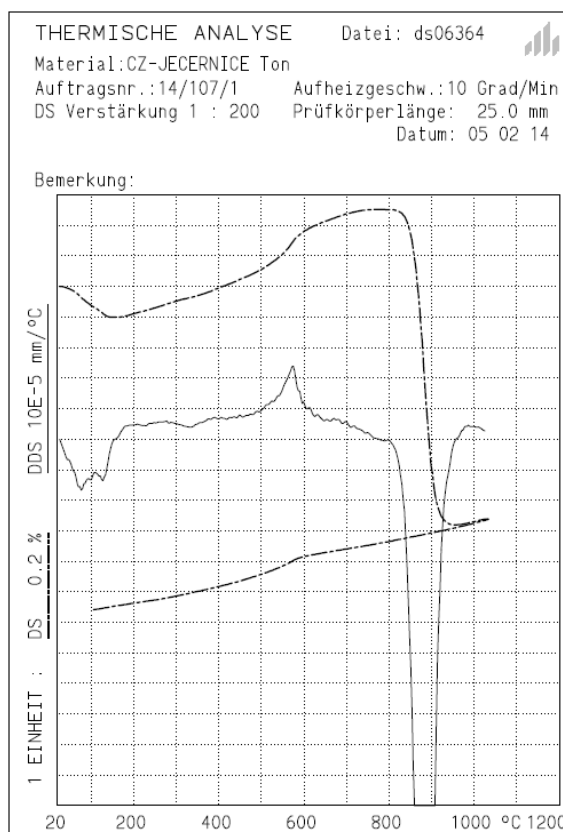
Z grafu níže (obr. 17) je patrné, že se vývoj objemového smrštění v závislosti na množství přidaného brusného prachu vyvíjí dle exponenciály, ta se však ve zkoumané oblasti velmi blíží lineární funkci. Lze také sledovat, že smrštění sušením je několikanásobně větší než smrštění výpalem. To je dáno vysokým obsahem záměsové vody v těstě (okolo 21 %), které obaluje jednotlivé částice. Při uvolňování vody ze vzorku při sušení se k sobě částice přibližují a dochází ke smršťování materiálu.



Obr. 17. Vliv přídavku brusného prachu na objemové smrštění

Materiál vykazuje také poměrně vysoké procento smrštění výpalem, ale až okolo teploty 870 °C, což je hodnota, které se běžně při výpalu nedosahuje. Smrštění materiálu při této teplotě je odrazem vlastností samotného jílu T14, který má ve směsi většinové zastoupení. Jeho chování při narůstající teplotě výpalu je jasně patrné z výsledku termické analýzy. V grafu (obr. 18) je viditelná náhlá objemová změna o velikosti přibližně 2 % právě v okolí teploty 870 °C. Z chemického a mineralogického složení jílové zeminy, které bylo blíže popsáno v kapitole 2.3.1.1, je možné odvodit, že toto smrštění je způsobeno fázovou přeměnou volného β -křemene na α -tridymit a tvorbou slinkových minerálů až do teploty 930 °C. [12] [13] [14] [18]

Za běžných podmínek výpalu dosahuje objemové smrštění pouze okolo 0,8 %, což nemá fatální vliv na soudržnost materiálu. Dojde-li však k překročení vypalovací teploty, například vlivem hoření zalisovaných paliv ve směsi a současným nedostatečným ochlazováním materiálu uvnitř skládky tahem spalín ke komínu, vznikají na cihlách trhliny v oblasti zmiňovaných teplot 850-930 °C.



Obr. 18. Výsledek termické analýzy jílu [12]

4.2.3.3 Nasákavost, zdánlivá pórovitost

Nasákavost a zdánlivá pórovitost materiálu jsou na sobě velmi závislé, proto jsou také posuzovány dle společné normy ČSN 72 1565 část 6 z roku 1985.

Stanovení se provádí na vypálených, vysušených vzorcích, které se zváží s přesností na 0,1 g (m_p). Ty se uloží na rošt do varné nádoby s destilovanou vodou tak, aby byly po celou dobu varu zcela ponořené, a aby se nedotýkaly sebe navzájem, ani stěn nádoby. Během 30 až 60 minut se voda uvede do varu, který se udržuje 2 hodiny. Během této doby se doplňuje odpařená voda tak, aby byly vzorky neustále nejméně 20 mm pod hladinou. Po ukončení varu se nádoba se vzorky nechá zchladnout až na teplotu místnosti. Poté se vyjme vzorek, na povrchu otře vlhkým hadrem a zváží na vzduchu (m_n). Nakonec se vzorek zváží na hydrostatických vahách pod destilovanou vodou (m'_n). [15]

Výpočet nasákavosti byl proveden dle podle vzorce

$$N = \frac{m_n - m_p}{m_p} \cdot 100 \quad (\%) \quad (10)$$

a výpočet zdánlivé pórovitosti dle vztahu

$$PZ = \frac{m_n - m_p}{m_n - m'_n} \cdot 100 \quad (\%) \quad (11)$$

kde m_n je hmotnost vzorku nasyceného vodou, váženého na vzduchu (g),

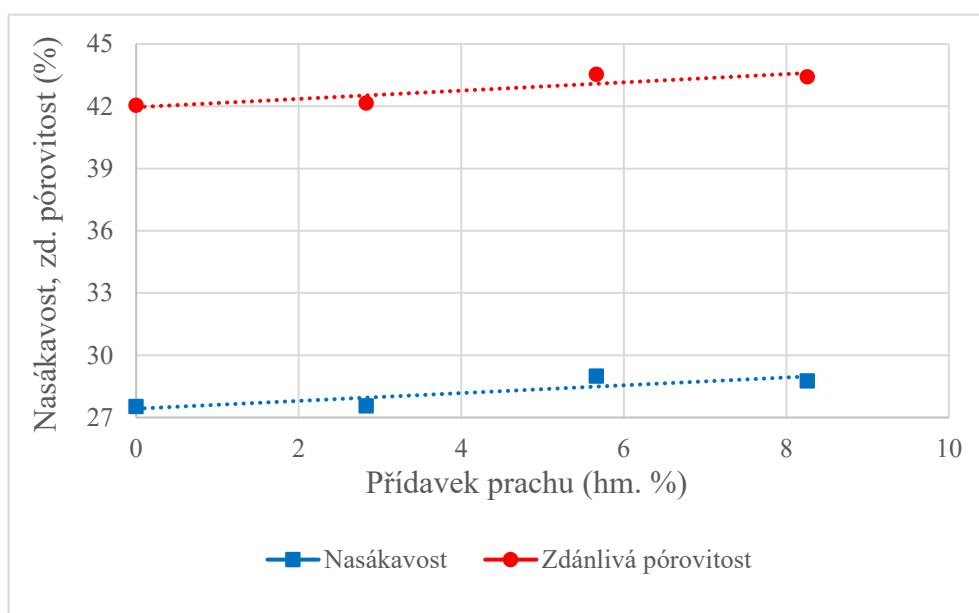
m_p - hmotnost vypáleného vzorku (g)

m'_n - hmotnost vzorku nasyceného vodou, váženého pod vodou (g). [15]

Tabulka 9. Vývoj nasákavosti a zdánlivé pórovitosti vzorků

Vzorek č.	Přídavek brusného prachu	m_p	m_n	m'_n	Nasákavost	Průměrná nasákavost	Zdánlivá pórovitost	Průměrná zdánlivá pórovitost
Jednotky	(hm. %)	(g)	(g)	(g)	(%)	(%)	(%)	(%)
IX	0,00	48,94	62,4	30,4	27,50	27,53	42,06	42,05
X		45,72	58,3	28,4	27,52		42,07	
XI		57,93	73,9	35,9	27,57		42,03	
XV	2,83	60,05	76,6	37,3	27,56	27,56	42,11	42,15
XVI		58,90	75,1	36,6	27,50		42,08	
XVII		59,24	75,6	36,9	27,62		42,27	
XXI	5,66	59,67	76,9	37,1	28,88	28,99	43,29	43,54
XXII		59,83	77,1	37,4	28,87		43,50	
XXIII		60,12	77,7	37,6	29,24		43,84	
XXVII	8,26	60,39	77,8	37,8	28,83	28,77	43,53	43,41
XXVIII		60,07	77,3	37,5	28,68		43,29	
XXIX		60,33	77,7	37,7	28,79		43,43	

Z dat naměřených během experimentu lze předpokládat, že nasákavost i zdánlivá pórovitost s rostoucím podílem brusného prachu ve směsi velmi pozvolna narůstají (viz obr. 19). Odhadnout však přesný trend, dle jakého se toto děje, není dost dobře možné, jelikož je rozdíl mezi zjištěným minimem a maximem u nasákavosti i zdánlivé pórovitosti pouze cca 1,5 % (viz tabulka 9) a může být ovlivněn chybou měření.



Obr. 19. Vliv přídavku brusného prachu na nasákavost a zdánlivou pórovitost

4.2.3.4 Ztráta hmotnosti pálením

Ztráta hmotnosti pálením je zjišťována taktéž dle normy ČSN 72 1565 část 6 z roku 1985, stejně jako nasákavost a zdánlivá pórovitost. Její hodnota se spočítá dle vztahu

$$ZP = \frac{m_s - m_p}{m_s} \cdot 100 \quad (\%) \quad (12)$$

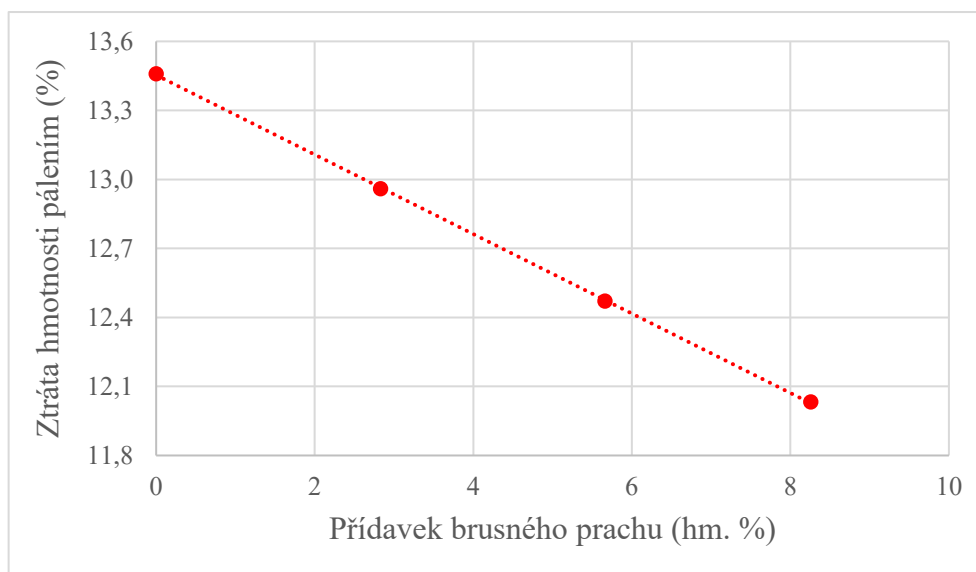
kde m_s je hmotnost vysušeného vzorku (g),

m_p - hmotnost vypáleného vzorku (g). [15]

Ztráty hmotnosti vypočítané z hodnot uvedených v předchozí kapitole v tabulce 8, jsou shrnuty v následující tabulce 10.

Tabulka 10. Vývoj ztráty hmotnosti pálením vzorků

Vzorek č.	Přídavek brusného prachu	Ztráta hmotnosti pálením	Průměrná ztráta hmotnosti pálením
Jednotky	(hm. %)	(%)	(%)
IX	0,00	13,46	13,46
X		13,52	
XI		13,40	
XV	2,83	13,02	12,96
XVI		13,00	
XVII		12,86	
XXI	5,66	12,46	12,47
XXII		12,52	
XXIII		12,44	
XXVII	8,26	11,99	12,03
XXVIII		12,09	
XIX		12,02	



Obr. 20. Vliv přídavku brusného prachu na ztrátu hmotnosti pálením

Na rozdíl od nasákavosti a zdánlivé pórovitosti je vývoj ztráty hmotnosti pálením téměř dokonale lineární a jasně viditelný, to je patrné z grafu na obr. 20. Při obsahu brusného prachu ve směsi 8,26 hm.% klesla ztráta pálením na 12,03 % z původních 13,46 % při nulovém obsahu prachu.

4.2.3.5 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku pálených zdících prvků se určuje dle normy ČSN EN 772-1+A1. Pro potřeby této diplomové práce byly zkoušky provedeny na laboratorním lisu Brio (viz obr. 21 a 22) s možností volby rychlosti zatěžování vzorku, jehož maximální lisovací síla činí 160 kN. Dle normy byla rychlost zatěžování pro předpokládanou pevnost okolo 10 N·mm⁻² zvolena 50 N·s⁻¹. [16]

Hodnota pevnosti v tlaku se vypočte jako podíl hodnoty největšího zatížení a účinné plochy vzorku, stejně jako ve vztahu (3).

$$P = \frac{F_{max}}{S} \quad (\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$$

kde F_{max} je maximální dosažená síla při zatěžování vzorku (N),

S - účinná plocha vzorku kolmá na směr zatěžovací síly (mm²),

která se spočítá ze vzorce pro plochu kruhu

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (\text{mm}^2)$$

kde d je průměr válcového vzorku (mm). [16]



Obr. 21. Laboratorní lis Brio

V tabulce 11 jsou uvedena naměřená a vypočtená data pevností v tlaku jednotlivých zkušebních vzorků.

Tabulka 11. Vývoj pevnosti v tlaku vzorků

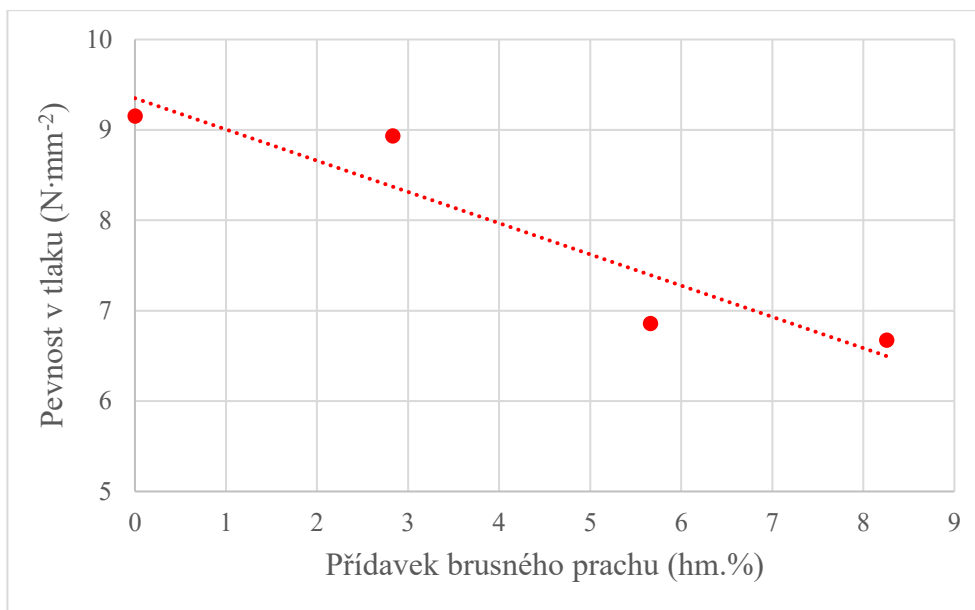
Vzorek č.	Přídavek brus. Prachu	Síla	Účinná plocha vzorku	Pevnost v tlaku	Průměrná pevnost v tlaku	Pokles pevnosti
Jednotky	(hm. %)	(N)	(mm ²)	(N·mm ²)	(N·mm ²)	(%)
XII	0,00	8560	877	9,76	9,15	0,0
XIII		8440	876	9,64		
XIV		7110	883	8,06		
XVIII	2,83	8480	901	9,42	8,93	2,4
XIX		7702	893	8,63		
XX		7862	899	8,75		
XXIV	5,66	6361	919	6,92	6,86	25,1
XXV		6428	924	6,96		
XXVI		6149	919	6,69		
XXX	8,26	6041	921	6,56	6,67	27,1
XXXI		6286	924	6,80		
XXXII		6171	927	6,66		

Z hodnot pevností v tlaku jasně vyplývá, že s přibývajícím množstvím brusného prachu ve směsi se pevnost páleného střepu snižuje. Při přídavku okolo 6 hm.% dochází již ke čtvrtinovému poklesu pevnosti oproti receptuře bez prachu. Vývoj pevnosti je jasně patrný z obrázku 23.

Na obr. 22 je možné vidět porušený zkušební vzorek podrobený zkoušce pevnosti v tlaku.



Obr. 22. Zkušební vzorek podroben zkoušce pevnosti v tlaku



Obr. 23. Vliv přídavku brusného prachu na pevnost v tlaku

4.2.4 Vyhodnocení experimentu

Celkem bylo vyrobeno 32 kusů zkušebních vzorků ve tvaru válečků o průměru 35 mm. Z tohoto počtu bylo 8 použito pro zjištění vhodného lisovacího tlaku zkušebních těles, dalších 24 vzorků s rozdílným množstvím podílu brusného prachu posloužilo ke stanovení objemové hmotnosti, objemového smrštění, nasákavosti, zdánlivé pórovitosti, ztráty hmotnosti pálením a pevnosti v tlaku. Z naměřených hodnot bylo možné odvodit změny jmenovaných vlastností pálených výrobků s narůstajícím množstvím brusného prachu ve směsi.

Praktické zkušenosti ze závodu v Jezernici nasvědčovaly tomu, že s přídavkem brusného prachu by mělo pravděpodobně dojít ke snížení objemové hmotnosti střepu. To se však neprokázalo. Z měření vyplývá, že přidáváním brusného prachu do cihlářského těsta v technologicky přijatelném množství, není OH nijak prokazatelně ovlivněna. To můžeme vnímat jako pozitivní zjištění, jelikož právě objemová hmotnost je jedna z nejsledovanějších vlastností pálených zdicích prvků a je třeba ji udržet v rozmezí $1520 \div 1680 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, aby bylo možné produkovat zboží 1. jakosti. Podstatné zjištění je to, že ač objemová hmotnost zůstává stejná, zvyšuje se hmotnost vzorku v důsledku nižší ztráty pálením. Nárůst hmotnosti je však přesně kompenzován snižujícím se celkovým objemovým smrštěním. Při výpočtu OH dle vztahu (5) tedy dopad vyšší naměřené hmotnosti vzorku v čitateli vyrovnává současný nárůst objemu vzorku ve jmenovateli zlomku. Změny se tak nijak ve výsledku neprojeví.

Objemové smrštění je ovlivněno zcela evidentně. S nárůstem podílu brusného prachu v receptuře se objemové smrštění, a to především sušením, zásadně zmenšuje. Z tohoto pohledu to tedy vypadá, že brusný prach působí ve směsi jako dobré ostřívo, což má velmi pozitivní vliv na vznik vad při sušení. Lze tedy předpokládat, že díky použití většího množství tohoto odpadního materiálu zpět do výroby, bude dosaženo lepší kvality výsušků, případně mírně nižší energetické náročnosti sušárny způsobené lepším odváděním vody ze středu výlisku na povrch. Je však třeba počítat s menší změnou rozměrů během výroby a tomu tedy přizpůsobit parametry lisování tak, aby neměl výsledný cihlový blok příliš velké rozměry.

Rozdíly v nasákavosti a zdánlivé pórovitosti jsou ve zkoumané oblasti téměř nepozorovatelné. Odchylka mezi recepturou zcela bez prachu a s přídavkem 8,26 hm.% je pouze okolo 1,5 % nárůstu obou veličin. V tomto ohledu bude mít přídavek prachu zřejmě minimální dopad na praktickou výrobu, zdali vůbec nějaký.

Jelikož je brusný prach již z vypáleného materiálu, neobsahuje prakticky žádné další spalitelné složky. Jeho přidáním tedy snižujeme procentuální podíl hořlavin ve směsi a tím se snižuje ztráta hmotnosti pálením vzorků. To se naprosto spolehlivě prokázalo i v experimentu, který byl předmětem této diplomové práce. Jak již bylo řečeno výše, nižší ztráta hmotnosti má za následek vzorky o vyšší hmotnosti, těm ale zůstává vyšší objem kvůli menšímu smrštění, nemá to tudíž žádný dopad na objemovou hmotnost. Je však pravděpodobné, že se dostaví negativní dopad ve formě vyšší spotřeby zemního plynu v tunelové peci v důsledku nižšího podílu spalitelných látek v surovině.

Nejzásadnější zjištění této diplomové práce spočívá v razantním poklesu pevnosti s růstem obsahu brusného prachu ve vzorcích. Z naměřených hodnot vyplývá, že při použití 8,26 hm.% prachu dochází k poklesu pevnosti v tlaku o 27 %. To je velmi významná změna, zvláště s přihlédnutím k tomu, že pevnost v tlaku je další velmi sledovaných vlastností cihlářských výrobků. Ty se v závodě Wienerberger cihelna Jezernice, spol. s.r.o. vyrábějí v pevnostech tzv. P8, P10 a P15, kde číslo za písmenem P označuje pevnost v $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$. U některých výrobků, jakými jsou běžné tlustostěnné bloky na obvodové stěny domů a na příčkové stěny, přesahuje skutečná pevnost deklarovanou hodnotu i o více než 50 %, bude-li tedy v budoucnu snaha závodu zvýšit podíl brusného prachu ve výrobcích, bude to nejspíš právě tento typ zdíva, u kterého to bude možné. Ostatní sortiment děrovaných cihlových bloků s tenkými stěnami, zaměřený na lepší tepelné vlastnosti se pohybuje běžně jen mírně nad hranicí deklarovaných hodnot pevností v tlaku. U těchto typů výrobků tedy zřejmě nebude možné zásadní navýšení obsahu brusného prachu, z důvodu nedostatečné pevnosti, nebo bude potřeba pozměnit recepturu tak, aby obsahovala více jílových složek, které naopak napomáhají pevnost zvýšit. Tím se však zároveň zhorší sušící vlastnosti těsta, jelikož jíly vystupují ve směsi jako plastická složka se značným smrštěním, které vede ke vzniku vad.

4.2.5 Praktická aplikace

Výsledky experimentu je možné aplikovat na konkrétní výrobky. Pro praktické vyhodnocení byl vybrán sortiment, který se vyrábí v závodě Wienerberger cihelna Jezernice s.r.o. celoročně v největším objemu. Jedná se o klasické tlustostěnné obvodové zdivo pro stavbu domů, které bylo pro potřeby této diplomové práce vyrobeno klasickým technologickým postupem ze stejné směsi, jaká byla použita pro laboratorní výzkum bez přídavku brusného prachu.

Průměrná objemová hmotnost střepu $1590 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, naměřená při kontrolně výrobní zkoušce, se nijak zásadně nezmění ani po přidání množství 8,26 hm. %. Rovněž u nasákavosti a zdánlivé pórovitosti nedojde k citelným změnám proti naměřeným 20,1 % resp. 31,7 %. Kde se však přídavek prachu zcela jistě projeví, je celkové objemové smrštění, které je při 8,26 hm. % již jen poloviční proti směsi zcela bez prachu. Jestliže bude snahou závodu v budoucnu navýšit podíl brusného prachu ve směsi, bude potřeba počítat už při lisování

s menším celkovým smrštěním. Aby byly zachovány deklarované rozměry bloků a nedocházelo ke zbytečnému plýtvání materiálem, bude třeba lisovat na menší rozměr, než je nyní zvykem. [17]

Po přidání 8,26 hm. % prachu také dojde k nižší ztrátě pálením o přibližně 1,4 %, což je přímo spojeno s energií, kterou mohou dodat výlisky do prostoru pece. Při použití většího množství prachu v surovině bude potřeba počítat se zvýšením energetické náročnosti výroby, nebo bude možné tuto ztrátu kompenzovat mírným zvýšením obsahu spalitelných látek so mixu. [17]

K nejzásadnější změně dojde ve vývoji pevnosti v tlaku. Konkrétně u výrobku, použitého pro praktickou aplikaci výzkumu, provozní zkouška odhalila průměrnou pevnost v tlaku $15,6 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$. Když od této hodnoty odečteme úbytek pevnosti 27,1 %, naměřený laboratorně při obsahu brusného prachu ve směsi 8,26 hm. %, získáme hodnotu $11,4 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$. To je stále vyšší hodnota, než deklarovaných $10 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$. [17]

Z těchto několika pohledů je jasné, že tento konkrétní výrobek má jisté rezervy ve svých parametrech, které je možné v praxi využít k dávkování nadstandardně vysokého obsahu brusného prachu, aniž by kvality výrobku klesly pod normované hodnoty. Tento sortiment je vhodným adeptem na výrobek, který bude schopen pohltnout velké množství vyprodukovaného odpadního prachu a vytvářet během času své výroby volnou kapacitu v sílech, která může být využita v jinou dobu, kdy je vyráběn sortiment, do kterého není možné prach dávkovat, například právě z důvodu snížení pevnosti v tlaku pod únosnou mez.

5 ZÁVĚR

První kapitola této diplomové práce se zabývá surovinami používanými pro výrobu cihlových zdicích bloků. Postupně charakterizuje ostřiva, lehčiva, plastifikační přísady, barviva, paliva a taviva a uvádí konkrétní příklady materiálů, které jsou takto využívány. Ve výrobním závodu Wienerberger cihelna Jezernice s.r.o. se můžeme setkat se sedmi základními artikly, ze kterých se tvoří surovinová směs. Hlavní složkou, která slouží jako pojivo celé směsi jsou jílové zeminy a spraše, zbytek tvoří různé přísady. Písek slouží jako ostřivo směsi, stejně jako dřevěné piliny, které mají navíc funkci paliva a lehčiva. Taktéž struska z kotlů zastává funkci ostřiva, lehčiva i paliva současně. Dále jsou do směsi přidávány papírenské kaly jako palivo a také prvek zlepšující vlastnosti sušení. V posledních letech je zpět do výroby recyklován brusný prach, který vzniká jako odpad při broušení cihlových bloků.

Ve druhé části práce je zmíněn technologický postup výroby, který má za úkol materiálu zmiňovanému v první kapitole dodat tvar a užité vlastnosti. Technologie je popsána od samotného začátku těžby a přípravy materiálu, přes lisování, sušení, výpal až po expedování výrobků zákazníkovi. Proces je z naprosté většiny plně automatizován a využívá moderní technologie jako např. robotické manipulátory, číslíkové řízení strojů apod.

Třetí, nejrozsáhlejší kapitola přináší výsledky z laboratorního výzkumu, který měl za úkol odhalit změny vlastností cihlového materiálu používaného v cihelně v Jezernici po přidání různého množství prachu z broušení cihel do výrobní směsi. Výzkum byl zaměřen na vlastnosti, které musí striktně odpovídat předpisům daným ve státní normě pro pálené zdicí prvky. Objemová hmotnost, nasákavost a zdánlivá pórovitost nebyly přidavkem brusného prachu nijak zásadně ovlivněny a v tomto ohledu nezpůsobuje recyklace prachu žádné potíže. Vliv na objemové smrštění a ztrátu hmotnosti pálením už je prokazatelný a při větší míře recyklace prachu ve skutečném provozu je potřeba těmto změnám přizpůsobit technologii lisování, sušení a výpalu, aby nedošlo k porušení rozměrové přesnosti finálního produktu. Nejzásadnější vliv byl zjištěn u pevnosti v tlaku. Ta s přibývajícím podílem prachu v surovině razantně klesá a je nejvíce limitující vlastností, která u některých, zvláště tenkostěnných a speciálních sortimentů, zcela vylučuje použití brusného prachu. To je ve vyšší míře, až do přibližně 8 hm. %, možné pouze u tlustostěnných výrobků, které běžně překonávají deklarovanou pevnost v tlaku až o desítky procent a je u nich tedy možné si dovolit o část pevnosti přijít.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] PYTLÍK, Petr. *Cihlářství*. Brno: FS VUT, 1995. ISBN 80-214-0612-7.
- [2] BENDER, Willi. *Vom Ziegelgott zum Industrieelektroniker: geschichte der ziegelherstellung von den anfängen bis heute*. 1. Auflage. Bonn: Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e. V., 2004. ISBN 3-9807595-1-2.
- [3] LACH, Vladimír. *Keramická příručka: tabulky a výpočty*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1958. Řada stavební literatury.
- [4] Wienerberger cihlářský průmysl a. s., České Budějovice. *Přísady v cihlářství*. 2012
- [5] Wienerberger cihelna Jezernice s. r. o., Jezernice. *Příručka FPC: systém řízení výroby u výrobce*. 2015
- [6] Geobrick Si & Pe spol. s. r. o., Brno. *PŘEROV – HRANICE cihlářské suroviny: vyhledávací průzkum (II. etapa)*. 1998
- [7] CARTER, C. B., NORTON, M. G. *Ceramic Materials: Science and Engineering*. 2nd ed. New York: Springer, 2013. ISBN 978-1-4614-3522-8.
- [8] KRIŽAN, David. *Vliv složení surovinové směsi na vlastnosti cihlářských výrobků*. Ostrava, 2016. Bakalářská práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství.
- [9] Wienerberger cihelna Jezernice s. r. o., Jezernice. *Kontrolně výrobní zkouška č.: 96/2017/JE 3241 JEZERNICE: Brusný prach 8.6.2017*. 2017.
- [10] ČSN EN 771-1+A1 (72 2634). *Specifikace zdicích prvků – Část 1: Pálené zdicí prvky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [11] ČSN EN 772-13 (72 2635). *Zkušební metody pro zdicí prvky – Část 13: Stanovení objemové hmotnosti materiálu zdicích prvků za sucha a objemové hmotnosti zdicích prvků za sucha (kromě zdicích prvků z přírodního kamene)*. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [12] Wienerberger Ziegelindustrie GmbH, Hennersdorf. *Laborergebnis CZ-JEZERNICE Rohmaterial 14/107*. 2014.
- [13] KOLLER, Aleš. *Structure and properties of ceramics*. New York: Elsevier, 1994. ISBN 0444987193.
- [14] BUDNIKOV, P. P. a A. M. GINSTLING. *Reactions in Mixtures of Solid Substances (Rusky)*. Moscow: Publishing House of Construction Literature, 1965.

- [15] ČSN 72 1565-6 (72 1565). *Zkoušení cihlářských zemin. Stanovení ztráty hmotnosti pálením, nasákavosti, zdánlivé pórovitosti a objemové hmotnosti*. Praha: Český normalizační institut, 1986.
- [16] ČSN EN 772-1+A1 (72 2635). *Zkušební metody pro zdicí prvky – Část 1: Stanovení pevnosti v tlaku*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [17] Wienerberger cihelna Jezernice s. r. o., Jezernice. *Kontrolně výrobní zkouška č.: 8/2018/JE*. 2018.
- [18] Geobrick Si & Pe spol. s. r. o., Brno. *PŘEROV – HRANICE cihlářské suroviny: vyhledávací průzkum (I. etapa)*. 1997

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Winklerův diagram pro cihlářské hlíny.....	12
Obr. 2. Hlinišťe	16
Obr. 3. Zleva halda s pilinami a se struskou.....	17
Obr. 4. Skříňové podavače	18
Obr. 5. Přípravna (v popředí kolový mlýn)	18
Obr. 6. Velkoobjemové boxy a korečkový bagr v odležárně surovin	19
Obr. 7. Šnekový lis za chodu.....	19
Obr. 8. Robotický manipulátor překládající nasekané bloky na ocelové latě	20
Obr. 9. Výstupní vrata tunelové pece	22
Obr. 10. Sklad zboží	24
Obr. 11. Histogram zrnitosti brusného prachu	25
Obr. 12. Diagram zrnitosti brusného prachu	26
Obr. 13. Vlhké zkušební vzorky	28
Obr. 14. Vypálené zkušební vzorky	28
Obr. 15. Závislost objemové hmotnosti střepu na lisovací síle vzorku.....	29
Obr. 16. Srovnání vzhledu vzorků s různým přídatkem prachu	31
Obr. 17. Vliv přídatku brusného prachu na objemové smrštění.....	35
Obr. 18. Výsledek termické analýzy jílu	36
Obr. 19. Vliv přídatku brusného prachu na nasákavost a zdánlivou pórovitost.....	37
Obr. 20. Vliv přídatku brusného prachu na ztrátu hmotnosti pálením	38
Obr. 21. Laboratorní lis Brio	39
Obr. 22. Zkušební vzorek podroben zkoušce pevnosti v tlaku.....	40
Obr. 23. Vliv přídatku brusného prachu na pevnost v tlaku.....	41

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1. Rozdělení jílových zemin podle granulometrie.....	10
Tabulka 2. Zastoupení oxidů v jílech T14.....	13
Tabulka 3. Naměřené a vypočtené hodnoty pro volbu lisovacích podmínek.....	28
Tabulka 4. Složení základní surovinové směsi.....	30
Tabulka 5. Testované receptury.....	31
Tabulka 6. Parametry zkušebních těles po vyliisování.....	32
Tabulka 7. Vývoj objemové hmotnosti vzorků	34
Tabulka 8. Vývoj objemového smrštění.....	34
Tabulka 9. Vývoj nasákavosti a zdánlivé pórovitosti vzorků.....	37
Tabulka 10. Vývoj ztráty hmotnosti pálením vzorků	38
Tabulka 11. Vývoj pevnosti v tlaku vzorků	40